

# **ESTUDO DE SENSIBILIDADE EM PROCESSOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO POROSOS**

simulação numérica com o TRHUMIDADE

**TERESA MANUEL STINGL LEAL ARAÚJO DE FREITAS**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES**

---

Orientadora: Professora Doutora Ana Sofia Moreira dos Santos Guimarães  
Teixeira

---

Coorientadora: Professora Doutora Isabel Cristina da Silva Martins Ribeiro

JUNHO DE 2016

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2015/2016**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-5081446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-5081440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2015/2016 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais e Irmã



## **Agradecimentos**

Ao terminar este trabalho quero manifestar o meu sincero agradecimento a todos aqueles que, ao longo destes quatro meses e a diferentes níveis, contribuíram para a sua realização.

Agradeço, em primeiro lugar, à Professora Ana Sofia Guimarães e à Professora Isabel Ribeiro, pela enorme disponibilidade, motivação, apoio e confiança com que sempre me ensinaram, e sem as quais este trabalho não seria possível.

Agradeço à minha família, por estarem sempre presentes. Ao meu pai pelos conselhos e pelas críticas certas, à minha mãe pela ajuda nas ilustrações e à minha irmã pelo exemplo e pela partilha de conhecimento que eu sempre incentivava.

Agradeço a todos os meus amigos, pelo exemplo de entusiasmo e dedicação no trabalho, que sempre me inspirou e motivou a fazer melhor.



## **Resumo**

A simulação numérica do desempenho higrotérmico da envolvente dos edifícios é cada vez mais importante, exigindo o conhecimento de programas de simulação higrotérmica avançados em regime dinâmico, bem como das propriedades dos materiais, das condições fronteira e das limitações dos próprios programas. A embebição é um processo complexo, aplicável ao estudo de humidificação de fachadas pela ação da precipitação, ou ao processo de humidificação por capilaridade de paredes e pavimentos em contacto com o solo.

Desde a década de 70 do século XX, que a modelação da transferência de calor e humidade tem sido objeto de estudos de investigação, conduzindo ao desenvolvimento de modelos matemáticos e numéricos capazes de calcular perfis do teor de humidade em elementos de construção.

Considerou-se que seria relevante, nesta dissertação, efetuar um estudo de sensibilidade, visando avaliar a influência das diversas propriedades dos materiais envolvidas no programa TRHUMIDADE. As análises de sensibilidade efetuadas, justificam-se pela dificuldade em encontrar valores completos dessas propriedades na bibliografia e pela dificuldade experimental em determiná-las. Comparam-se os resultados fornecidos pelo TRHUMIDADE e pelo WUFI Pro 5.2, com os resultados experimentais dos perfis de embebição obtidos no Laboratório de Física das Construções (LFC), com o intuito de fazer uma validação genérica dos programas. Os objetivos principais desta dissertação, são os de contribuir para a construção de uma base de dados do programa TRHUMIDADE, com as propriedades dos materiais, e categorizar a influência das várias propriedades nos resultados do processo de embebição.

A abordagem seguida assenta numa dissertação de investigação, que mais do que resolver um problema concreto da engenharia civil, serve para consolidar metodologias de investigação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Humidade, embebição, simulação numérica, estudo de sensibilidade, TRHUMIDADE.





## **ABSTRACT**

The numerical simulation of the hygrothermal performance of building envelopes is increasingly important, requiring knowledge on advanced hygrothermal simulation programs in transient regime, as well as on material properties, boundary conditions and modeling limitations. The wetting process is complex and is relevant for humidification studies of façades due to rainfall action or rising damp by capillary water uptake on walls and pavements in contact with the ground.

The modelling of heat and mass transfer has been a subject of several research studies since 1970 leading to the development of mathematical and numerical models capable of calculating relative humidity profiles on building elements.

In this dissertation, it was considered pertinent to perform a sensitivity study aiming to access the influence of the various material properties involved in the program TRHUMIDADE. The sensitivity analysis is justified by the scarcity of complete properties for the program in the literature and the experimental difficulty in determining them. A comparison between the results in terms of wetting profiles for TRHUMIDADE and WUFI Pro 5.2 was carried out, together with the experimental results measured on the Laboratory of Building Physics (LFC), allowing a general validation of the two programs. The main goals of this work are to contribute to the elaboration of a material properties database for TRHUMIDADE program and to classify the influence of the input properties on the wetting profiles results.

The followed approach is based on a research dissertation, which more than solving a concrete problem of civil engineering, serves to consolidate research methodologies.

**KEYWORDS:** moisture, wetting profiles, numerical simulation, sensitivity study, TRHUMIDADE.



## **ÍNDICE GERAL**

<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>i</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>v</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. ENQUADRAMENTO.....	1
1.2. ÂMBITO E OBJETIVOS.....	2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	3
<b>2 CARACTERIZAÇÃO DO PROGRAMA TRHUMIDADE .....</b>	<b>5</b>
2.1. INTRODUÇÃO .....	5
2.2. MODELIZAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E HUMIDADE NO TRHUMIDADE .....	5
2.2.1. MODELO TEÓRICO DE TRANSFERÊNCIA DE LUIKOV E PHILIP – DE VRIES.....	5
2.2.1.1. HIPÓTESES SIMPLIFICATIVAS E LIMITAÇÕES DO MODELO.....	7
2.2.1.2. VALIDAÇÃO DO MODELO PARA ESTUDOS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	8
2.2.2. RESOLUÇÃO NUMÉRICA DAS EQUAÇÕES DE LUIKOV E PHILIP – DE VRIES.....	8
2.3. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA .....	10
2.3.1. SEQUÊNCIA DO PROCESSO DE COMPUTAÇÃO: PROGRAMA PRINCIPAL E SUB-ROTINAS .....	10
2.3.1.1. DADOS DE ENTRADA.....	12
2.3.1.2. INTRODUÇÃO DO EFEITO DA RADIAÇÃO SOLAR .....	14
2.3.1.3. INTERPOLAÇÃO DOS COEFICIENTES FENOMENOLÓGICOS.....	16
2.3.1.4. SAÍDA DE RESULTADOS.....	17
2.4. SÍNTESE DO CAPÍTULO .....	23
<b>3 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E HIGROTÉRMICAS NECESSÁRIAS À EXECUÇÃO DO TRHUMIDADE .....</b>	<b>25</b>
3.1. INTRODUÇÃO .....	25
3.2. MASSA VOLÚMICA SECA .....	25
3.3. CALOR ESPECÍFICO DO MATERIAL SECO .....	27
3.4. POROSIDADE .....	29
3.5. CURVA HIGROSCÓPICA .....	31

<b>3.6. DIFUSIVIDADE HÍGRICA .....</b>	<b>38</b>
<b>3.7. DIFUSIVIDADE HIGROTÉRMICA.....</b>	<b>44</b>
<b>3.8. CONDUTIBILIDADE TÉRMICA .....</b>	<b>48</b>
<b>3.9. SUCÇÃO CAPILAR .....</b>	<b>51</b>
<b>3.10. CONSTRUÇÃO DE UMA BASE DE DADOS PARA O PROGRAMA TRHUMIDADE .....</b>	<b>55</b>
<b>3.11. SÍNTESE DO CAPÍTULO .....</b>	<b>69</b>
 <b>4 ESTUDO DE SENSIBILIDADE DAS PROPRIEDADES ENVOLVIDAS NO TRHUMIDADE NUM PROCESSO DE EMBEBIÇÃO.....</b>	 <b>71</b>
<b>4.1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>71</b>
<b>4.2. ESTUDOS ANTERIORES.....</b>	<b>71</b>
<b>4.3. SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....</b>	<b>72</b>
4.3.1. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DAS 8 PROPRIEDADES NECESSÁRIAS AO PROGRAMA.....	72
4.3.1.1. MASSA VOLÚMICA SECA .....	73
4.3.1.2. CALOR ESPECÍFICO DO MATERIAL SECO .....	82
4.3.1.3. POROSIDADE .....	85
4.3.1.4. CURVA HIGROSCÓPICA.....	86
4.3.1.5. SUCÇÃO CAPILAR.....	91
4.3.1.6. DIFUSIVIDADE HÍGRICA.....	93
4.3.1.7. DIFUSIVIDADE HIGROTÉRMICA .....	98
4.3.1.8. CONDUTIBILIDADE TÉRMICA .....	103
<b>4.4. SÍNTESE DO CAPÍTULO .....</b>	<b>107</b>
 <b>5 VALIDAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO TRHUMIDADE.....</b>	 <b>109</b>
<b>5.1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>109</b>
<b>5.2. COMPARAÇÃO DOS PERFIS DE EMBEBIÇÃO EM MATERIAIS POROSOS UTILIZANDO O TRHUMIDADE E O WUFI PRO 5.2 .....</b>	<b>109</b>
<b>5.3. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM OS OBTIDOS PELOS PROGRAMAS TRHUMIDADE E WUFI PRO 5.2 .....</b>	<b>113</b>
<b>5.4. POTENCIALIDADES DO TRHUMIDADE .....</b>	<b>117</b>
<b>5.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO .....</b>	<b>118</b>
 <b>6 CONCLUSÕES.....</b>	 <b>121</b>
<b>6.1. SÍNTESE DAS CONCLUSÕES OBTIDAS.....</b>	<b>121</b>

**6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....122**

**ANEXOS**

**ANEXO 1 – DADOS DE ENTRADA: INTDADOS**

**ANEXO 2 – DADOS DE ENTRADA: METE**

**ANEXO 3 – DADOS DE ENTRADA: SOLIN E SOLIT**

**ANEXO 4 – DADOS DE ENTRADA: COEFICIENTES FENOMENOLÓGICOS**

**ANEXO 5 – AUMENTO DO TEMPO DE SIMULAÇÃO NO BETÃO CELULAR, PARA AS CONDIÇÕES DE BASE**

**ANEXO 6 – SIMULAÇÕES PARA A ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA MASSA VOLÚMICA SECA,  $\rho_0$**

**ANEXO 7 – SIMULAÇÕES PARA A ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO CALOR ESPECÍFICO,  $C_0$**

**ANEXO 8 – SIMULAÇÕES PARA A ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA CURVA HIGROSCÓPICA**

**ANEXO 9 – SIMULAÇÕES PARA A ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA DIFUSIVIDADE HÍGRICA,  $D_W$**

**ANEXO 10 – SIMULAÇÕES PARA A ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA DIFUSIVIDADE HIGROTÉRMICA,  $D_T$**

**ANEXO 11 – SIMULAÇÕES PARA A ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA CONDUTIBILIDADE TÉRMICA,  $\lambda$**



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Aplicação do método das diferenças finitas.....	9
Figura 2 – Organograma do programa TRHUMIDADE. ....	11
Figura 3 – Dados de entrada do programa.....	13
Figura 4 – Introdução do efeito da radiação solar no TRHUMIDADE[1].....	15
Figura 5 – Interpolação dos coeficientes fenomenológicos.....	17
Figura 6 – Excerto do ficheiro de resultados, RTH, para a simulação de base do betão celular. ....	18
Figura 7 – Perfis de teor de humidade e temperatura ao longo do tempo. ....	19
Figura 8 – Influência do teor de humidade na variação da resistência térmica. ....	20
Figura 9 –Evolução dos fluxos de humidade que atravessam a superfície de separação material-ar, ao longo do tempo. ....	20
Figura 10 – Perfis do teor de humidade, ao longo do tempo, num elemento de barro vermelho. ....	21
Figura 11 – Perfis do teor de humidade, ao longo do tempo, num elemento de betão celular. ....	22
Figura 12 – Comportamento higroscópico de materiais de construção em função da humidade relativa (adaptado de Freitas, 1992) [1].....	31
Figura 13 – Descrição convencional dos teores de humidade de referência de um material poroso. ....	32
Figura 14 – Diferentes tipos de curvas higroscópicas (adaptado de Hansen,1986) [14].....	32
Figura 15 – Esboço de curvas que traduzem a relação entre o teor de humidade higroscópico e a H.R., resultantes da interrupção do processo de adsorção ou desadsorção. ....	33
Figura 16 – Influência da temperatura na curva de desadsorção da madeira, resultados obtidos por <i>Krischer</i> [14] .....	34
Figura 17 – Princípio do cálculo de Boltzman [16] .....	39
Figura 18 – Princípio de cálculo pelo método dos perfis [16] .....	40
Figura 19 – Equipamento envolvido no método “Guarded-hot-plate” (LFC – FEUP) [8]. ....	48
Figura 20 – Equipamento envolvido no método do choque térmico (LFC-FEUP). ....	49
Figura 21 – Fenómeno da capilaridade [1].....	52
Figura 22 – Esquema do método do “prato de pressão” [25]. ....	52
Figura 23 – Vetor VLIN do barro vermelho, com os teores de humidade a partir dos quais são definidos $D_w$ , $D_T$ , $S$ e $\lambda$ . ....	55

Figura 24 – Variação dos perfis do teor de humidade em embebição face à variação da massa volúmica seca do barro vermelho, considerando $T_{ext}=25^{\circ}C$ , $HR_{ext}=100\%$ , $T_{int}=25^{\circ}C$ e $HR_{int}=50\%$ (simulações: 6-BVp, 7-BVp, <b>8-BVp</b> , 9-BVp e 10-BVp). .....	75
Figura 25 – Variação dos perfis do teor de humidade em embebição face à variação da massa volúmica seca do betão celular, considerando $T_{ext}=25^{\circ}C$ , $HR_{ext}=100\%$ , $T_{int}=25^{\circ}C$ e $HR_{int}=50\%$ (simulações: 6-BCp, 7-BCp, <b>8-BCp</b> , 9-BCp e 10-BCp). .....	75
Figura 26 – Variação dos perfis do teor de humidade em embebição face à variação da massa volúmica seca do barro vermelho, considerando uma $T_{ext}=25^{\circ}C$ , $HR_{ext}=100\%$ , $T_{int}=25^{\circ}C$ e $HR_{int}=90\%$ (simulações: 11-BVp, 12-BVp, 13-BVp, 14-BVp e 15-BVp). .....	77
Figura 27 – Variação dos perfis do teor de humidade em embebição face à variação da massa volúmica seca do barro vermelho, considerando uma $T_{ext}=25^{\circ}C$ , $HR_{ext}=100\%$ , $T_{int}=25^{\circ}C$ e $HR_{int}=10\%$ (simulações: 1-BVp, 2-BVp, 3-BVp, 4-BVp, e 5-BVp). .....	78
Figura 28 – Variação dos perfis do teor de humidade em embebição face à variação da massa volúmica seca do betão celular, considerando uma $T_{ext}=25^{\circ}C$ , $HR_{ext}=100\%$ , $T_{int}=25^{\circ}C$ e $HR_{int}=95\%$ (simulações: 41-BCp, 42-BCp, 43-BCp, 44-BCp e 45-BCp). .....	78
Figura 29 – Variação dos perfis do teor de humidade em embebição face à variação da massa volúmica seca do betão celular, considerando uma $T_{ext}=25^{\circ}C$ , $HR_{ext}=100\%$ , $T_{int}=25^{\circ}C$ e $HR_{int}=85\%$ (simulações: 31-BCp, 32-BCp, 33-BCp, 34-BCp e 35-BCp). .....	79
Figura 30 – Comparação dos fenómenos na superfície interior dos elementos ao comportamento de um funil com água. ....	79
Figura 31 – Comparação do total de água absorvida no barro vermelho, em função da massa volúmica seca (simulações 6-BVp, 7-BVp, 8-BVp, 9-BVp e 10-BVp). .....	80
Figura 32 – Teor de humidade na superfície interior de um elemento de betão celular, em função da HR da ambiência interior e da massa volúmica seca, ao fim de 360h de embebição (simulações 11-BCp a 50-BCp). .....	81
Figura 33 – Evolução do teor de humidade ao longo do tempo na face interior do betão, em função da massa volúmica seca e da HR da ambiência interior (simulações: 26-BCp a 30-BCp; 41-BCp a 45-BCp) .....	81
Figura 34 – Variação dos perfis do teor de humidade em embebição face à variação do calor específico seco do barro vermelho, considerando: $T_{ext}=25^{\circ}C$ , $HR_{ext}=100\%$ , $T_{int}=25^{\circ}C$ e $HR_{int}=50\%$ (simulações: 1-BVc, 2-BVc, <b>3-BVc</b> , 4-BVc e 5-BVc). .....	84
Figura 35 – Variação dos perfis do teor de humidade em embebição face à variação do calor específico seco do betão celular, considerando: $T_{ext}=25^{\circ}C$ , $HR_{ext}=100\%$ , $T_{int}=25^{\circ}C$ e $HR_{int}=50\%$ ( simulações: 1-BCc, 2-BCc, <b>3-BCc</b> , 4-BCc, 5-BCc). .....	84
Figura 36 – Distribuição dos poros no barro vermelho e no betão celular. ....	85
Figura 37 – Representação esquemática dos perfis do teor de humidade em embebição, evidenciando as duas faces de embebição no betão celular. ....	86
Figura 38 – Curva higroscópica de referência (vermelho) e curva higroscópica máxima (laranja) para o barro vermelho. ....	87



Figura 39 – Curva higroscópica de referência (cinzento escuro) e curva higroscópica máxima (cinzento claro) para o betão celular. ....	87
Figura 40 – Variação dos perfis do teor de humidade em embebição face ao aumento da higroscopicidade do barro vermelho, considerando uma $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ , $HR_{ext}=100\%$ , $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$ e $HR_{int}=50\%$ (simulações: 1-BVch, 2-BVch, 3-BVch, 4-BVch e <b>5-BVch</b> ). ....	88
Figura 41 – Variação dos perfis do teor de humidade em embebição face ao aumento da higroscopicidade do betão celular, considerando uma $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ , $HR_{ext}=100\%$ , $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$ e $HR_{int}=50\%$ (simulações: 1-BCch, 2-BCch, 3-BCch, 4-BCch e <b>5-BCch</b> ). ....	89
Figura 42 – Variação dos perfis do teor de humidade em embebição face à diminuição da higroscopicidade do betão celular, considerando uma $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ , $HR_{ext}=100\%$ , $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$ e $HR_{int}=50\%$ (simulações: <b>5-BCch</b> , 6-BCch, 7-BCch, 8-BCch e 9-BCch) ....	90
Figura 43 – Zona da estrutura porosa “lubrificada” devido ao fenómeno da higroscopicidade. ....	90
Figura 44 – Variação dos perfis do teor de humidade me embebição face à variação da sucção capilar do barro vermelho, considerando: $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ , $HR_{ext}=100\%$ , $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$ e $HR_{int}=50\%$ (simulações: 1-BVs, 2-BVs e 3-BVs). ....	92
Figura 45 – Variação dos perfis do teor de humidade em embebição face à variação da sucção capilar do betão celular, considerando: $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ , $HR_{ext}=100\%$ , $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$ e $HR_{int}=50\%$ (simulações: 1-BCs, 2-BCs e 3-BCs). ....	92
Figura 46 – Diminuição da progressão da frente húmida no barro vermelho, por efeito da redução de $D_w$ , considerando: $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ , $HR_{ext}=100\%$ , $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$ e $HR_{int}=50\%$ (simulações: <b>6-BVdw</b> e 11-BVdw ). ....	95
Figura 47 – Diminuição da progressão da frente húmida no betão celular, por efeito da redução de $D_w$ , considerando: $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ , $HR_{ext}=100\%$ , $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$ e $HR_{int}=50\%$ (simulações: <b>8-BCdw</b> e 13-BCdw). ....	95
Figura 48 – Aumento da progressão da frente húmida no betão celular, por efeito do acréscimo de $D_w$ , considerando: $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ , $HR_{ext}=100\%$ , $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$ e $HR_{int}=50\%$ (simulações: <b>8-BCdw</b> e 4-BCdw). ....	96
Figura 49 – Instabilidade no programa para as horas iniciais ( $T=24\text{h}$ , $T=48\text{h}$ e $T=72\text{h}$ ), considerando: $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ , $HR_{ext}=100\%$ , $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$ e $HR_{int}=50\%$ (simulação: 1-BCdw). ....	97
Figura 50 – Comparação do total de água absorvida no betão celular, em função da difusividade higríca, ao longo do tempo (utilizando resultados das simulações: 4-BCdw, 5-BCdw, 6-BCdw, 7-BCdw, 8-BCdw, 9-BCdw, 10-BCdw, 11-BCdw, 12-BCdw). ....	98
Figura 51 – Variação dos perfis do teor de humidade em embebição face à variação da difusividade higrótérmica do barro vermelho, considerando: $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ , $HR_{ext}=100\%$ , $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$ e $HR_{int}=50\%$ (simulações: 7-BVdt, <b>12-BVdt</b> e 13-BVdt). ....	101
Figura 52 – Variação dos perfis do teor de humidade em embebição face à variação da difusividade higrótérmica do betão celular, considerando: $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ , $HR_{ext}=100\%$ , $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$ e $HR_{int}=50\%$ (simulações: 7-BCdt, <b>9-BCdt</b> e 10-BCdt). ....	101
Figura 53 – Variação dos perfis do teor de humidade em embebição face à variação da difusividade higrótérmica do barro vermelho, considerando: $T_{ext}=10^{\circ}\text{C}$ , $HR_{ext}=100\%$ , $T_{int}=50^{\circ}\text{C}$ e $HR_{int}=50\%$ (simulações: 2-BVdt, 4-BVdt e 6-BVdt). ....	102

Figura 54 – Variação dos perfis do teor de humidade em embebição face à variação da difusividade higrotérmica do betão celular, considerando: $T_{ext}=10^{\circ}C$ , $HR_{ext}=100\%$ , $T_{int}=50^{\circ}C$ e $HR_{int}=50\%$ (simulações: 2-BCdt, 4-BCdt e 6-BCdt). .....	102
Figura 55 – Variação dos perfis do teor de humidade em embebição face à variação da difusividade higrotérmica do barro vermelho, considerando: $T_{ext}=50^{\circ}C$ , $HR_{ext}=100\%$ , $T_{int}=10^{\circ}C$ e $HR_{int}=50\%$ (simulações: 16-BVdt, 17-BVdt e 19-BVdt).....	103
Figura 56 – Variação dos perfis do teor de humidade em embebição face à variação da condutibilidade térmica do barro vermelho, considerando: $T_{ext}=10^{\circ}C$ , $HR_{ext}=100\%$ , $T_{int}=50^{\circ}C$ e $HR_{int}=50\%$ (simulações: 1-BV $\lambda$ , 2-BV $\lambda$ , 3-BV $\lambda$ e 4-BV $\lambda$ ). .....	105
Figura 57 – Perfis de temperatura para o barro vermelho em função da condutibilidade térmica, ao fim de 72h e 96h do processo de embebição, considerando: $T_{ext}=10^{\circ}C$ , $HR_{ext}=100\%$ , $T_{int}=50^{\circ}C$ e $HR_{int}=50\%$ (simulações: 1-BV $\lambda$ , 2-BV $\lambda$ , 3-BV $\lambda$ e 4-BV $\lambda$ ). .....	106
Figura 58 –Variação dos perfis do teor de humidade em embebição face à variação da condutibilidade térmica do barro vermelho, considerando: $T_{ext}=50^{\circ}C$ , $HR_{ext}=100\%$ , $T_{int}=10^{\circ}C$ e $HR_{int}=50\%$ (simulações: 10-BV $\lambda$ e 11-BV $\lambda$ ). .....	106
Figura 59 – Perfis de temperatura para o barro vermelho em função da condutibilidade térmica, ao fim de 72h e 96h do processo de embebição, considerando: $T_{ext}=50^{\circ}C$ , $HR_{ext}=100\%$ , $T_{int}=10^{\circ}C$ e $HR_{int}=50\%$ (simulações: 10-BV $\lambda$ e 11-BV $\lambda$ ). .....	107
Figura 60 - <i>Moisture storage function</i> [15].....	110
Figura 61 - Comparação dos perfis de embebição do barro vermelho, utilizando o TRHUMIDADE e o WUFI Pro 5.2, considerando: $T_{ext}=T_{int}=T_{inicial\ provete}=20^{\circ}C$ , $HR_{ext}=100\%$ e $HR_{int}=50\%$ . .....	112
Figura 62 – Comparação dos perfis de embebição do betão celular, utilizando o TRHUMIDADE e o WUFI Pro 5.2, considerando: $T_{ext}=T_{int}=T_{inicial\ provete}=20^{\circ}C$ , $HR_{ext}=100\%$ e $HR_{int}=50\%$ . .....	113
Figura 63 – Esquema do equipamento utilizado na medição dos teores de humidade por atenuação de radiações gama, existente no LFC da FEUP. ....	113
Figura 64 – Comparação dos perfis de embebição do barro vermelho, obtidos experimentalmente por atenuação de radiação gama (cinzento) e pelos programas de simulação TRHUMIDADE (amarelo) e WUFI Pro 5.2 (azul), considerando: $T_{ext}=T_{int}=T_{inicial\ provete}=25^{\circ}C$ , $HR_{ext}=100\%$ e $HR_{int}=50\%$ . .....	114
Figura 65 - Comparação dos perfis de embebição do betão celular, obtidos experimentalmente por atenuação de radiação gama (cinzento) e pelos programas de simulação TRHUMIDADE (amarelo) e WUFI Pro 5.2 (azul), considerando: $T_{ext}=T_{int}=T_{inicial\ provete}=25^{\circ}C$ , $HR_{ext}=100\%$ e $HR_{int}=50\%$ . .....	115
Figura 66 – Combinações de temperaturas iniciais dos materiais e das ambiências estudadas nos programas TRHUMIDADE e WUFI Pro 5.2. ....	115
Figura 67 – Comparação dos perfis de embebição no betão celular utilizando o TRHUMIDADE, considerando: $HR_{ext}=100\%$ , $HR_{int}=50\%$ e variando as condições das temperaturas segundo as situações a), b1), b2), c) e d) definidas na Figura 66. ....	116
Figura 68 - Comparação dos perfis de embebição no betão celular utilizando o WUFI Pro 5.2, considerando: $HR_{ext}=100\%$ , $HR_{int}=50\%$ e variando as condições das temperaturas segundo as situações a), b1), b2), c) e d) definidas na Figura 66. ....	116

Figura 69 – Vantagem da utilização do gradiente do teor de humidade face ao gradiente de humidade relativa, como potencial de transferência de humidade. ....118



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Normas de ensaio relativas à determinação da massa volúmica seca. ....	26
Tabela 2 – Valores de $\rho_0$ encontrados na literatura, para diferentes materiais porosos. ....	27
Tabela 3 – Valores de $C_0$ , encontrados na literatura, para diferentes materiais porosos. ....	28
Tabela 4 – Normas de ensaio relativas à determinação da porosidade. ....	30
Tabela 5 – Valores de $\xi$ , encontrados na literatura, para diferentes materiais porosos. ....	30
Tabela 6 – Curvas higroscópicas, encontradas na literatura, para diferentes materiais porosos. ....	35
Tabela 7 – Valores de $D_w$ , encontrados na literatura, para diferentes materiais porosos. ....	42
Tabela 8 – Valores de $D_T$ , encontrados na literatura, para diferentes materiais porosos. ....	45
Tabela 9 – Normas de ensaio relativas à determinação da condutibilidade térmica. ....	49
Tabela 10 – Valores de $\lambda$ , encontrados na literatura, para diferentes materiais porosos. ....	50
Tabela 11 – Valores de $S$ , encontrados na literatura, para diferentes materiais porosos. ....	53
Tabela 12 – Identificação dos materiais onde há uma maior diferença entre o teor de humidade de saturação e o teor de humidade mais elevado, para a elaboração de VLIN. ....	56
Tabela 13 – Ficha com as propriedades necessárias ao TRHUMIDADE para o betão. ....	57
Tabela 14 – Ficha com as propriedades necessárias ao TRHUMIDADE para o gesso. ....	59
Tabela 15 – Ficha com as propriedades necessárias ao TRHUMIDADE para os painéis de madeira. ....	61
Tabela 16 – Ficha com as propriedades necessárias ao TRHUMIDADE para o poliuretano. ....	63
Tabela 17 – Ficha com as propriedades necessárias ao TRHUMIDADE para o poliestireno expandido .....	65
Tabela 18 – Ficha com as propriedades necessárias ao TRHUMIDADE para a lã de vidro. ....	67
Tabela 19 – Avaliação das propriedades quanto ao processo de determinação experimental e disponibilidade na literatura. ....	69
Tabela 20 – Princípio das simulações efetuadas em cada subcapítulo. ....	72
Tabela 21 – Gama de valores adotados no estudo de sensibilidade de $\rho_0$ , para cada um dos materiais. ....	73
Tabela 22 – Descrição das simulações efetuadas para o estudo de sensibilidade de $\rho_0$ . ....	74
Tabela 23 – Organização das simulações. ....	76
Tabela 24 – Gama de valores adotados no estudo de sensibilidade de $C_0$ , para cada um dos materiais. ....	82

Tabela 25 – Descrição das simulações efetuadas para o estudo de sensibilidade de $C_0$ . ....	83
Tabela 26 – Organização das simulações. ....	83
Tabela 27 – Curvas higroscópicas adotadas na análise de sensibilidade de cada um dos materiais. ....	86
Tabela 28 – Descrição das simulações efetuadas na análise de sensibilidade da curva higroscópica. ..	87
Tabela 29 – Organização das simulações. ....	88
Tabela 30 – Gama de valores adotados na análise de sensibilidade da sucção capilar. ....	91
Tabela 31 – Descrição das simulações efetuadas para o estudo de sensibilidade da sucção capilar ....	91
Tabela 32 – Gama de valores adotados na análise de sensibilidade da difusividade hídrica. ....	93
Tabela 33 - Descrição das simulações efetuadas no estudo de sensibilidade da difusividade hídrica. ..	94
Tabela 34 - Organização das simulações. ....	94
Tabela 35 – Gama de valores adotados na análise de sensibilidade da difusividade higrotérmica. ....	98
Tabela 36 - Descrição das simulações efetuadas no estudo de sensibilidade da difusividade higrotérmica. ....	99
Tabela 37 – Organização das simulações. ....	100
Tabela 38 – Gama de valores adotados na análise de sensibilidade da condutibilidade térmica. ....	104
Tabela 39 - Simulações efetuadas no estudo de sensibilidade da condutibilidade térmica. ....	104
Tabela 40 – Organização das simulações. ....	105
Tabela 41 – Grau de influência das propriedades no processo de embebição de materiais de construção porosos. ....	108
Tabela 42 – Propriedades dos materiais requeridas pelo WUFI Pro 5.2 e TRHUMIDADE. ....	109
Tabela 43 – Curva do teor de humidade em função da HR introduzida no WUFI Pro 5.2, para o barro vermelho. ....	111

## SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

$\rho_i$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Densidade do material, i
$\rho_w$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Densidade da água
$m_{ic}$	[kg/m <sup>2</sup> .s]	Densidade do fluxo de massa transporta por convecção
$m_{id}$	[kg/m <sup>2</sup> .s]	Densidade do fluxo de massa transporta por difusão
$q$	[J/m <sup>2</sup> .s]	Densidade de fluxo de calor transportado por condução
$M_i$	[kg/m <sup>3</sup> .s]	Termo traduzindo a condensação-evaporação
$h_i$	[J.m <sup>3</sup> /kg]	Entalpia mássica do material, i
$\psi$	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	Teor de humidade
$U$	[kg/kg]	Teor de humidade
$U_{máx}$	[kg/kg]	Teor de humidade máximo
$U_{sat}$	[kg/kg]	Teor de humidade de saturação
$U_{cr}$	[kg/kg]	Teor de humidade crítico
$U_h$	[kg/kg]	Teor de humidade higroscópico
$W$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Teor de humidade
$W_{máx}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Teor de humidade máximo
$W_{sat}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Teor de humidade de saturação
$W_{cr}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Teor de humidade crítico
$W_h$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Teor de humidade higroscópico
$T$	[°C]	Temperatura
$t$	[h]	tempo
$D_w$	[m <sup>2</sup> /s]	Difusividade higríca
$D_T$	[m <sup>2</sup> /s.K]	Difusividade higrótérmica
$\rho^*$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Massa volúmica equivalente
$C^*$	[J/kg.K]	Calor específico equivalente
$\lambda^*$	[W/m.K]	Condutibilidade térmica aparente
$\beta$	[m/s]	Coefficiente de transferência superficial de humidade
$\beta_e$	[m/s]	Coefficiente de transferência superficial de humidade exterior
$\beta_i$	[m/s]	Coefficiente de transferência superficial de humidade interior
$PS$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Pressão de saturação
$PS_{sup}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Pressão de saturação à superfície
$PS_{amb}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Pressão de saturação do ambiente
$HR$	[%]	Humidade relativa
$HR_{sup}$	[%]	Humidade relativa à superfície
$HR_{amb}$	[%]	Humidade relativa do ambiente
$h$	[W/m <sup>2</sup> .°C]	Coefficiente de transferência superficial de calor
$g$	[kg/m <sup>2</sup> .s]	Densidade do fluxo de secagem

$T_{sol}$	[°C]	Temperatura fictícia ar-sol
$T_{extfic}$	[°C]	Temperatura fictícia da ambiência exterior
$q$	[W/m <sup>2</sup> ]	Fluxo de calor
$K$	[W/m <sup>2</sup> .°C]	Coefficiente de transmissão térmica
$h_e$	[W/m <sup>2</sup> .°C]	Condutância térmica superficial exterior
$R_{term}$	[m <sup>2</sup> .°C/W]	Resistência térmica do elemento construtivo
$\rho_0$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Massa volúmica seca do material
$\xi$	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	Porosidade
$\lambda$	[W/m.K]	Condutibilidade térmica
$S$	[Pa]	Sucção capilar
$A_w$	[Kg/m <sup>2</sup> .s <sup>1/2</sup> ]	Coefficiente de absorção de água
$V_a$	[m <sup>3</sup> ]	Volume da fase gasosa
$V_l$	[m <sup>3</sup> ]	Volume da fase líquida
$V_{sol}$	[m <sup>3</sup> ]	Volume da fase sólida
$g_w$	[kg/m <sup>2</sup> .s]	Fluxo médio de humidade
$\mu$	[-]	Fator de resistência à difusão de vapor de água
$D_{ws}$	[m <sup>2</sup> /s]	Coefficiente de transferência de água líquida por sucção
$D_{ww}$	[m <sup>2</sup> /s]	Coefficiente de transferência de água líquida por redistribuição
$W_{80}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Teor de humidade para HR=80% (WUFI Pro 5.2)
$W_f$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Teor de humidade de saturação (WUFI Pro5.2)
$\alpha$	[-]	Coefficiente de absorção da parede
$\varepsilon_{T=\frac{D_T}{D_W}}$	[K <sup>-1</sup> ]	Fator do gradiente de temperatura
FEUP	-	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
LFC	-	Laboratório de Física das construções
IBP	-	Fraunhofer-Institut für Bauphysik



# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO

A simulação numérica do desempenho higrotérmico de elementos da envolvente dos edifícios tem assumido um papel cada vez mais relevante, exigindo o conhecimento de programas avançados de simulação higrotérmica em regime dinâmico, das propriedades dos materiais, das condições fronteira, bem como das limitações dos próprios programas. A transferência de humidade por embebição é um processo complexo, aplicável ao estudo de humedificação de paredes de fachadas pela ação da precipitação, ou ao processo de humedificação por capilaridade de paredes e pavimentos em contacto com o solo. Considera-se que esta dissertação, embora incida apenas no processo de embebição de elementos monolíticos, contribui para o estudo da simulação de elementos de construção em contacto com água no estado líquido.

Desde a década de 70 do século XX [1], que a modelação da transferência de calor e humidade tem sido objeto de estudo de investigação, conduzindo ao desenvolvimento de modelos matemáticos, com a consequente criação de modelos numéricos capazes de calcular perfis do teor de humidade em elementos de construção. Alguns desses modelos utilizam como potencial de transferência de humidade o gradiente de humidade relativa (HR), enquanto outros utilizam o gradiente do teor de humidade como força motriz desse transporte. A título de exemplo, refira-se o programa WUFI, desenvolvido pelo Fraunhofer IBP, que utiliza o gradiente de HR como potencial, enquanto o TRHUMIDADE, desenvolvido na FEUP nos finais da década de 80, utiliza o gradiente do teor de humidade [2].

Considerou-se que seria relevante, nesta dissertação, efetuar um estudo de sensibilidade, visando avaliar a influência das diversas propriedades dos materiais necessárias à execução do programa TRHUMIDADE, recentemente reescrito pelas professoras Ana Sofia Guimarães e Isabel Ribeiro. As análises de sensibilidade efetuadas, justificam-se pela dificuldade em encontrar valores completos dessas propriedades na bibliografia e pela dificuldade experimental envolvida na determinação de algumas dessas propriedades. Por outro lado, procurou-se comparar os resultados obtidos através do TRHUMIDADE com os do WUFI Pro 5.2, e compará-los com os resultados experimentais dos perfis de embebição obtidos no Laboratório de Física das Construções (LFC) na década de 80, com o objetivo de efetuar uma validação genérica dos modelos.

Num período de cerca de quatro meses é bastante difícil realizar uma abordagem muito profunda de um problema tão complexo, pela necessidade de conhecer os modelos matemáticos, os modelos numéricos que lhes estão associados, as propriedades indispensáveis ao processo de simulação e ter capacidade de interpretar os resultados obtidos com os estudos de sensibilidade efetuados. Procurou-se, no entanto, refletir de uma forma muito concisa, sobre a influência da variabilidade de cada um dos parâmetros

individualmente, mesmo sabendo que se tratam de situações de simulação, uma vez que num material real não é possível alterar um dos parâmetros sem modificar outras propriedades.

A abordagem seguida assenta numa dissertação de investigação, que mais do que resolver um problema concreto da engenharia civil, serve para consolidar metodologias de investigação que sejam úteis para futuros trabalhos nesta área.

## **1.2. ÂMBITO E OBJETIVOS**

Este trabalho centra-se na análise de sensibilidade dos perfis de embebição em processos de absorção de água, obtidos com recurso ao programa TRHUMIDADE, face à variação das propriedades dos materiais requeridas como dados de entrada para a execução do programa. Com os resultados das análises de sensibilidade pretende-se clarificar a maior ou menor exigência na avaliação dos valores a considerar para cada propriedade.

Assim, definiram-se objetivos claros nesta dissertação, que se podem dividir em objetivos principais e complementares.

Os objetivos principais são os seguintes:

1. Contribuir para a construção de uma base de dados para o programa TRHUMIDADE com as propriedades dos materiais;
2. Categorizar a influência das várias propriedades nos resultados do processo de embebição, através da interpretação das consequências da variabilidade de cada uma das propriedades nos perfis de embebição;
3. Comparar os resultados dos perfis do teor de humidade obtidos com dois programas de simulação diferentes, de modo a contribuir para a validação numérica do TRHUMIDADE.

A materialização dos objetivos principais exigiu a concretização dos seguintes objetivos complementares:

- Interpretar e descrever o programa TRHUMIDADE, as suas equações de base, o desenvolvimento numérico e as ligações entre as diferentes sub-rotinas;
- Refletir sobre as potencialidades do programa, em particular os resultados possíveis de obter;
- Uniformizar os valores disponíveis das propriedades dos materiais, apresentados por diferentes autores, compatibilizando-os com as unidades utilizadas pelo TRHUMIDADE;
- Refletir sobre a normalização e procedimentos experimentais necessários à medição das propriedades dos materiais requeridas pelo TRHUMIDADE, de modo a classificar o grau de dificuldade de obtenção de cada parâmetro;
- Compreender a influência das ambiências num processo de embebição de um provete monolítico;
- Transformar os perfis do teor de humidade em valores quantitativos globais do transporte de humidade, de modo a interpretar melhor os resultados;
- Calcular os perfis do teor de humidade com o programa WUFI Pro 5.2, o que exigiu uma compreensão das propriedades a introduzir e o estudo e conhecimento do funcionamento do programa;

- Estudar a reprodutibilidade dos resultados com os programas TRHUMIDADE e WUFI Pro 5.2, em situações similares, face à variabilidade das propriedades com a temperatura.

### **1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

A presente dissertação divide-se em seis capítulos:

- O capítulo 1 introduz os restantes capítulos, resume os objetivos do trabalho e apresenta a organização da dissertação;
- O capítulo 2 corresponde à apresentação e caracterização do programa TRHUMIDADE, desde o modelo que está na sua base, até ao algoritmo utilizado na determinação da solução pretendida. A caracterização do programa é elaborada a partir da ligação sequencial das diferentes sub-rotinas ao programa principal. Contém a descrição dos dados de entrada necessários e dos resultados de saídas, que são primeiramente apresentados de forma a evidenciar todas as potencialidades do programa, e só posteriormente contextualizados ao caso em estudo. Assim, no final do capítulo, incluem-se os resultados dos perfis de embebição para o barro vermelho e para o betão celular, que constituem as simulações de referência para as análises de sensibilidade efetuadas no capítulo 4;
- O capítulo 3 sistematiza um conjunto de informações relativas a cada uma das propriedades físicas e higrótérmicas, necessárias como dados de entrada para efetuar simulações no programa TRHUMIDADE. Para cada uma das oito propriedades apresenta-se a sua caracterização, a descrição dos procedimentos experimentais, referências a normas de ensaio adotadas e um pequeno levantamento de valores disponíveis na literatura para cada um dos parâmetros. Esse trabalho de pesquisa permitiu classificar cada uma das propriedades quanto ao grau de dificuldade da determinação experimental e quanto à disponibilidade na literatura. O capítulo termina com um contributo para a construção de uma base de dados do programa, incluindo 6 fichas de materiais que reúnem as propriedades necessárias à execução do TRHUMIDADE;
- O capítulo 4 descreve as simulações efetuadas nas análises de sensibilidade de cada uma das propriedades, necessárias à execução do programa TRHUMIDADE, em processos de absorção de água de elementos monolíticos de barro vermelho e de betão celular. Os resultados obtidos permitiram categorizar cada uma dessas propriedades de acordo com o seu grau de influência nos resultados. Assim, reuniu-se um conjunto de informação, que permite identificar que propriedades se devem medir, e que propriedades se podem estimar, atendendo ao grau de influência nos perfis de embebição;
- O capítulo 5, engloba o trabalho de validação dos perfis de embebição, em materiais de construção porosos, obtidos com o TRHUMIDADE. Inclui a comparação dos resultados entre dois programas de simulação higrótérmica: o TRHUMIDADE e o WUFI Pro 5.2, e a validação por comparação com perfis do teor de humidade experimentais obtidos por atenuação de radiações gama. Apresenta-se por fim as potencialidades dos modelos que utilizam o gradiente do teor de humidade como potencial de transferência de humidade, do qual o TRHUMIDADE é exemplo.
- O capítulo 6 resume as principais conclusões e perspetivas de desenvolvimento nos futuros trabalhos de investigação.



## 2

# CARACTERIZAÇÃO DO PROGRAMA TRHUMIDADE

### 2.1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo, procurou-se efetuar uma apresentação, ainda que simplificada, do programa de simulação numérica TRHUMIDADE, começando pelo modelo e sistema de equações que estão na base do programa, até ao algoritmo envolvido na sequência do processo de cálculo. A descrição do programa pretende por um lado, ser abrangente o suficiente para destacar as suas potencialidades, e por outro lado estar contextualizada com o objetivo traçado para este trabalho. Assim sendo, a caracterização dos dados de entrada necessários e a exposição dos resultados possíveis, será concretizada, simultaneamente, com a apresentação das simulações que servirão de termo comparativo para a análise de sensibilidade efetuada no capítulo 4. Deste modo, as simulações intituladas de base para os dois materiais estudados: o barro vermelho e o betão celular, ficarão conhecidas no final do capítulo.

### 2.2. MODELIZAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E HUMIDADE NO TRHUMIDADE

#### 2.2.1. MODELO TEÓRICO DE TRANSFERÊNCIA DE LUIKOV E PHILIP – DE VRIES

O estudo dos fenómenos de transferência conjunta de calor e humidade em meios porosos não saturados, em particular em materiais de construção, revestem-se de enorme importância, tendo despertado a partir de 1950 o aparecimento de vários modelos capazes de descrever esse processo. De referir inevitavelmente o modelo de *Glaser*, que apesar de se basear unicamente na lei de Fick, e de, portanto só permitir o estudo da transferência de humidade em fase de vapor, é ainda hoje muito utilizado dada a grande simplicidade com que permite prever as condensações. Outro modelo importante e que marca a primeira tentativa de descrever a transferência de humidade em materiais porosos, considerando simultaneamente a fase de vapor e a fase líquida, é o modelo de *Krischer-Vos*. Contudo, este modelo, faz depender o transporte da fase líquida apenas do gradiente de humidade, desprezando o efeito do gradiente de temperatura.

O modelo matemático que está na base do programa TRHUMIDADE foi estabelecido por *Luikov e Philip – De Vries*, apresentando como vantagem acrescida permitir o estudo simultâneo da transferência de humidade global (fase líquida e fase de vapor), bem como da transferência de calor. Na realidade, apesar dos estudos desenvolvidos por *Luikov e Philip – De Vries* serem independentes, o sistema de equações proposto pelos dois autores é análogo. A diferença está unicamente na escolha do tipo de variável para o teor de humidade: ponderal (kg/kg) para *De Vries* e volúmico ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ) para *Luikov*[1].

Numa perspetiva global e simplificada, a difusão de humidade segundo *Luikov e Philip – De Vries*, pode ser descrita do seguinte modo:

- Na fase de vapor, a transferência de humidade realiza-se inicialmente a partir dos poros repletos de ar, sob o efeito do gradiente de pressão parcial de vapor de água (baseando-se na Lei de Fick, para traduzir a difusão de vapor). A determinada altura, o vapor condensa nas regiões frias por forma a atingir o equilíbrio com as pressões existentes, iniciando-se a transferência em fase líquida.
- Na fase líquida, a transferência é realizada sob o efeito do gradiente de sucção (recorrendo à lei de Darcy para traduzir o transporte líquido).

Em geral, como já foi referido anteriormente, estes dois modos de transferência são simultâneos e estão associados diretamente à transferência de calor (assente na lei de Fourier)[3].

No programa de cálculo automático TRHUMIDADE utiliza-se o teor de humidade ponderal, pelo que a obtenção das equações simplificadas de *Philip-De Vries* implica o desenvolvimento das equações de conservação da massa e de calor, para meios macroscopicamente homogêneos, seguidamente apresentadas em (1) e (2):

Conservação da massa:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_i \psi_i) = -\nabla(m_{ic} + m_{id}) + M_i \quad (1)$$

Conservação de energia:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_i h_i + \rho_w h_w \psi_i) = -\nabla(q + h_w(m_{ic} + m_{id})) \quad (2)$$

Em que,

$\rho_i, \rho_w$	– Densidade do material i e da água, respetivamente	[kg/m <sup>3</sup> ]
$m_{ic}, m_{id}$	– Densidade de fluxo de massa transportada por convecção e difusão	[kg/m <sup>2</sup> s]
$q$	– Densidade de fluxo de calor transportado por condução	[J/m <sup>2</sup> s]
$M_i$	– Termo traduzindo a condensação - evaporação do material i	[kg/m <sup>3</sup> s]
$h_i, h_w$	– Entalpias mássicas do material i e da água, respetivamente	[J.m <sup>3</sup> /kg]
$\psi_i$	– Teor de humidade do material	[m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> ]

A obtenção do sistema de equações diferenciais de *Philip-De Vries* a partir das equações (1) e (2) implica a utilização de vários pressupostos e hipóteses simplificativas apresentadas no subcapítulo 2.2.1.1., para além das já referidas leis de difusão de massa (Fick e Darcy) e de calor (Fourier). Esse desenvolvimento encontra-se expresso no trabalho elaborado por Vasco Freitas [1].

Assim, o sistema de equações diferenciais, desenvolvido no programa TRHUMIDADE, para simular o comportamento das paredes dos edifícios à transferência conjunta de calor e humidade, para um fluxo unidirecional em regime variável é o definido pelas equações (3) e (4):

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_w \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3)$$

$$\rho^* C^* \cdot \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \chi} \left( \lambda^* \cdot \frac{\partial T}{\partial \chi} \right) \quad (4)$$

Em que,

$U$	– Teor de humidade	[kg/kg]
$T$	– Temperatura	[°C]
$D_w$	– Difusividade hídrica	[m <sup>2</sup> /s]
$D_T$	– Difusividade higrotérmica	[m <sup>2</sup> /s.K]
$\rho^*$	– Massa volúmica equivalente	[kg/m <sup>3</sup> ]
$C^*$	– Calor específico equivalente	[J/kg.K]
$\lambda^*$	– Condutibilidade térmica aparente	[W/m.K]

#### 2.2.1.1. HIPÓTESES SIMPLIFICATIVAS E LIMITAÇÕES DO MODELO

Na obtenção das equações (3) e (4) foram introduzidos, implícita ou explicitamente, os seguintes pressupostos simplificativos [1]:

- Não há qualquer reação química entre a água e a estrutura porosa;
- Os materiais de construção não são permeáveis ao ar;
- A água é incompressível;
- Os materiais porosos encontram-se submetidos a fracos gradientes de temperatura;
- Considera-se desprezável o potencial de gravidade;
- O transporte de calor devido ao fenómeno de evaporação/condensação é desprezável face ao transporte por difusão;
- O teor de humidade em fase líquida é muito mais elevado do que em fase de vapor.

A acrescentar às hipóteses simplificativas anteriores, a teoria de *Philip-De Vries* apresenta como principais limitações[1]:

- A estrutura dos materiais tem de ser indeformável, o que é válido para a maioria dos materiais de construção;
- Os materiais utilizados devem ser isotrópicos e macroscopicamente homogéneos;
- O comportamento diferenciado em embebição e secagem – fenómeno de *histeresis* – é desprezado;
- O modelo não considera o fenómeno de congelamento, ebulição ou degelo, pelo que a temperatura dos materiais deve estar compreendida entre os 4°C e os 99°C.

#### 2.2.1.2. VALIDAÇÃO DO MODELO PARA ESTUDOS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Importa referir que a teoria de *Philip –De Vries*, quando adotada para o desenvolvimento do programa TRHUMIDADE em 1992, já tinha demonstrado ser adequada na previsão dos fenómenos de transferência conjunta de calor e humidade em diversos estudos. De facto, são vários os autores, que provaram que os resultados experimentais obtidos nos seus trabalhos apresentavam uma boa concordância com os valores teóricos obtidos a partir do modelo de *Philip –De Vries*.

A título de exemplo, destacam-se alguns autores que muito contribuíram para a validação do modelo em causa, e cujos trabalhos já foram elencados com mais profundidade por Vasco Freitas em [1].

Em 1972, *Van der Kooi* ao desenvolver um estudo sobre transferência de humidade em coberturas em terraço com suporte em betão celular, verificou uma boa correlação entre os valores de humidade total obtidos experimentalmente e por simulação numérica.

Em 1973, *Jury*, estudou a transferência unidirecional de calor e humidade em meios arenosos, obtendo perfis de humidade experimentais parcialmente concordantes com os obtidos por simulação numérica.

*Crausse*, em 1983, deu um importante contributo quando num estudo mais exaustivo de verificação experimental da teoria de *Philip –De Vries* para a caracterização da transferência unidirecional de calor e humidade, concluiu que a modelização teórica evidenciava bem a realidade.

*Perrin*, em 1985 veio reforçar a validade do modelo, desta vez aplicado às paredes dos edifícios.

O próprio trabalho desenvolvido por *Vasco Freitas* em 1992, através das simulações efetuadas com o programa TRHUMIDADE, mostrou mais uma vez a validação do modelo teórico de *Philip –De Vries*, procurando além disso constituir um contributo para solucionar uma das lacunas associadas ao modelo: a descontinuidade do teor de humidade nos elementos de fronteira.

Fica assim demonstrado, que apesar de permanecerem algumas dúvidas sobre as previsões geradas pelo modelo quando existe uma certa imprecisão nos valores dos coeficientes fenomenológicos intervenientes nas equações de transferência de humidade, que a teoria de *Philip –De Vries* pode servir de base a estudos de simulação numérica em elementos de construção.

#### 2.2.2. RESOLUÇÃO NUMÉRICA DAS EQUAÇÕES DE LUIKOV E PHILIP – DE VRIES

Vários autores já apresentaram a resolução numérica do sistema de equações diferenciais proposto por *Luikov e Philip-De Vries*, o qual utiliza a temperatura e o gradiente de teor de humidade como potenciais de transferência. Contudo, grande parte desses estudos, foi desenvolvido para meios semi-indefinidos ou elementos constituídos por uma só camada [1]. De facto, a dificuldade em resolver o problema da interface entre materiais, devido à descontinuidade gerada no perfil do teor de humidade, levou a que a resolução do sistema de equações aplicado a paredes de múltiplas camadas tenha sido menos utilizado e desenvolvido. Se por um lado, alguns autores procuraram solucionar o problema da interface modificando o modelo de *Philip-De Vries* através da utilização da pressão capilar ou do gradiente de HR como potenciais de transferência [2], por outro lado, outros autores procuraram mostrar que o teor de humidade poderia ser utilizado como força motriz na transferência de humidade, mesmo através da interface entre materiais de construção porosos. No primeiro grupo, podem-se referir autores como *Pedersen e Künzle*, que adotaram, respetivamente, a pressão de sucção capilar e a HR como potenciais de transferência de humidade [2]. No segundo grupo, é possível referir *Fauconnier e Kiessl* [1]. O desenvolvimento do sistema de equações diferenciais de *Philip-De Vries* levado a cabo no programa TRHUMIDADE assenta nesta última filosofia.



O sistema de equações a resolver no programa é então o apresentado em 2.2.1, pelas equações (3) e (4). Trata-se de um sistema não linear, onde o autor do programa, atendendo às dificuldades inerentes na interface e ao fluxo envolvido ser unidirecional, optou pelo método das diferenças finitas para a sua resolução.

O objetivo passa por determinar as funções  $U(x,t)$  e  $T(x,t)$  que satisfazem o sistema de equações acima mencionado. Atendendo a que se trata de um modelo 1D, só as variações na direção  $x$  serão consideradas, sendo que na direção  $y$  as propriedades são assumidas constantes. Por esse motivo, as funções anteriores devem ser deriváveis em relação ao tempo no intervalo  $[0, T]$  e duas vezes deriváveis em relação ao espaço no intervalo  $[0, L]$ .

O método das diferenças finitas utilizado implica a discretização do elemento construtivo, conseguido através da construção de uma grelha com nós nos quais o sistema de equações diferenciais é resolvido. Nas simulações efetuadas nesta dissertação com o programa TRHUMIDADE adotou-se uma grelha retangular, com intervalos igualmente espaçados, quer na direção  $x$ , onde a distância entre dois nós sucessivos é representada por  $\Delta x$  (m), quer na direção  $y$ , onde a distância entre nós sucessivos corresponde à discretização no tempo efetuada,  $\Delta t$  (h). Na Figura 1, representa-se a grelha utilizada nas simulações deste trabalho, onde  $\Delta x=0,005\text{m}$  e  $\Delta t=0,1\text{h}=6\text{ min}$ , evidenciando os 41 nós em que os elementos de barro vermelho e de betão celular, com 20cm de espessura, são divididos.

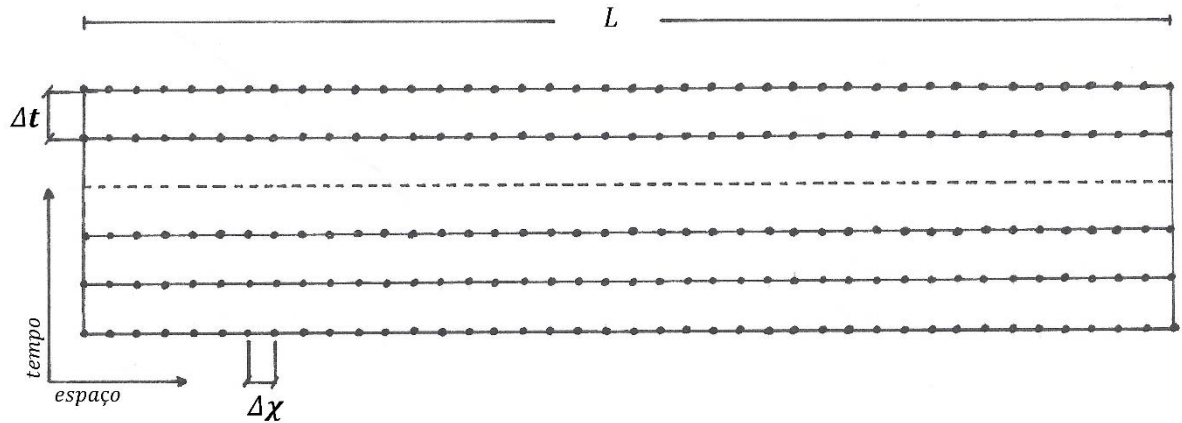


Figura 1 – Aplicação do método das diferenças finitas

Os nós interiores implicam a resolução do sistema em parte corrente, que não é mais do que o desenvolvimento das equações (3) e (4). Já os nós em contacto com o ambiente (interior ou exterior), implicam a imposição de condições fronteira, que permitem determinar as restantes incógnitas. Assim, as igualdades impostas no limite material-ar, são as definidas pelas equações (5) e (6):

Igualdade de fluxo de humidade:

$$\rho_0 \cdot D_w \left( \frac{\partial U}{\partial x} + D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = \beta [PS_{sup} \cdot HR_{sup} - PS_{amb} \cdot HR_{amb}] \quad (5)$$

Igualdade de fluxo de calor:

$$\left( \Lambda^* \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = h(T_{amb} - T_{sup}) \quad (6)$$

Em que,

$\beta$	– Coeficiente de transferência superficial de humidade	[m/s]
$PS$	– Pressão de saturação	[kg/m <sup>3</sup> ]
$HR$	– Humidade relativa	[%]
$sup$	– Superfície	[-]
$amb$	– Ambiente	[-]
$h$	– Coeficiente de transferência superficial de calor	[W/m <sup>2</sup> .°C]

Os processos envolvidos até à linearização do sistema em causa são complexos, envolvendo a utilização de um método implícito designado por algoritmo de *Crank-Nicholson* e podem ser encontrados de forma simplificada na tese de doutoramento de *Vasco Freitas* [1] e de forma mais aprofundada em [3]. O algoritmo utilizado para resolver o sistema de equações lineares é o método de eliminação de *Gauss*, sendo a solução final para um determinado instante obtida quando a diferença entre duas interações consecutivas é inferior a uma dada precisão.

## 2.3. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA

### 2.3.1. SEQUÊNCIA DO PROCESSO DE COMPUTAÇÃO: PROGRAMA PRINCIPAL E SUB-ROTINAS

O programa TRHUMIDADE foi desenvolvido em *Fortran 77*, assentando basicamente na resolução das equações de transferência de calor e humidade pelo método das diferenças finitas. Internamente, o código de cálculo é composto pelo programa principal - TRHUMIDADE - e por oito sub-rotinas:

- SOL - cálculo da temperatura fictícia ar-sol;
- COFENOM - interpolação dos coeficientes fenomenológicos;
- GAUSSBACON - resolução de um sistema linear de equações de matriz diagonal pelo método de Gauss;
- MATAMB - cálculo das equações nos nós em contacto com as ambiências;
- MATINT - cálculo das equações nos nós das interfaces;
- MATCOR - cálculo das equações nos nós interiores;
- PSATURAÇÃO - cálculo da pressão de saturação;
- HURELAT - cálculo da humidade relativa dos nós superficiais em função do teor de humidade.

O programa principal e as sub-rotinas foram desenvolvidas na íntegra por *Vasco Freitas*, em 1992 na sequência da sua tese de doutoramento. A exceção são as sub-rotinas GAUSSBACON e SOL, que apenas sofreram pequenas adaptações, tendo sido desenvolvidas, respetivamente, pelo *Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse* e por *Vitor Abrantes*, na sua tese de doutoramento em 1984 [4].

Na Figura 2 é possível obter uma visão global da sequência dos processos de computação, evidenciando a ligação das diferentes sub-rotinas com o programa principal, o processo e critério iterativo de convergência, o tipo de dados necessários bem como os resultados obtidos.

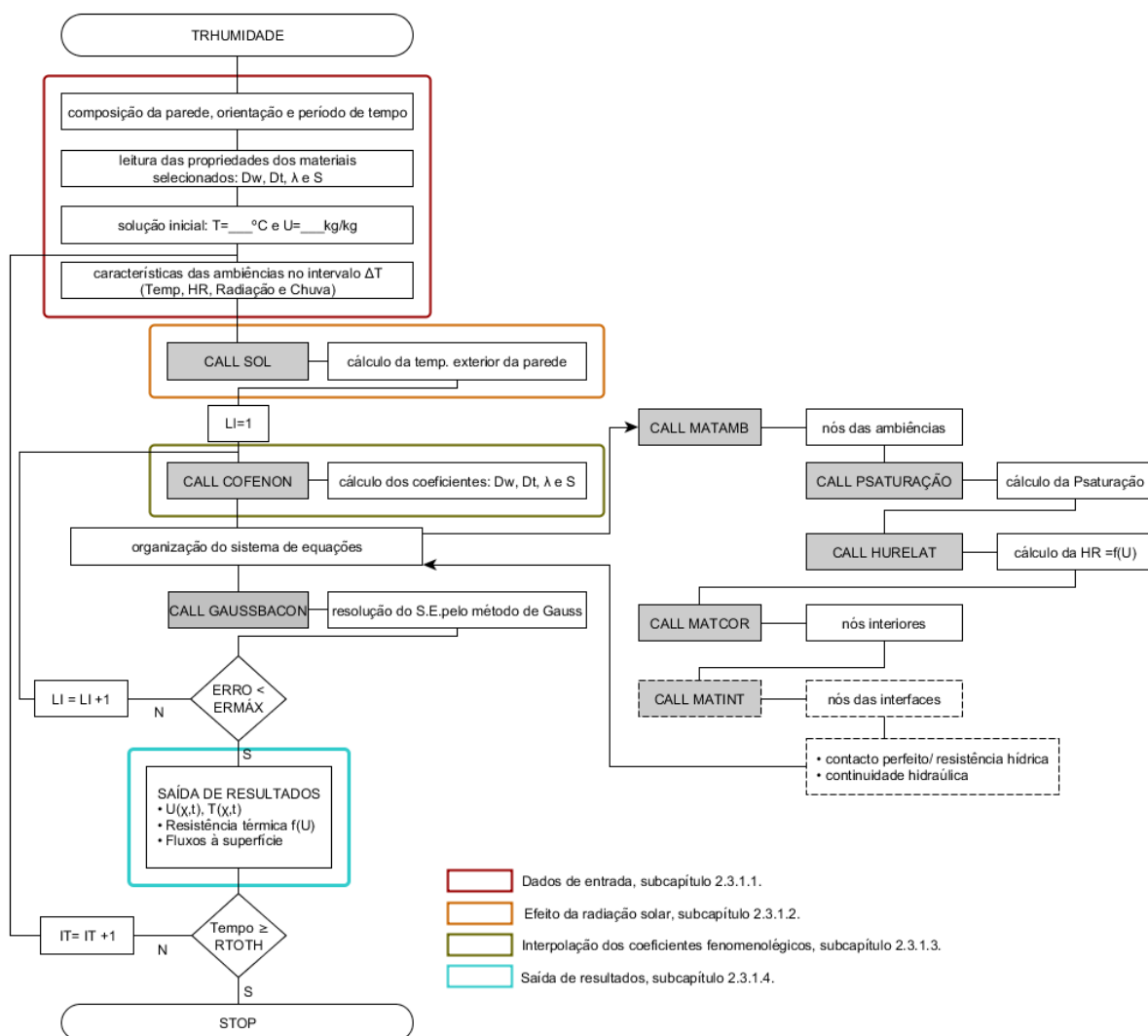


Figura 2 – Organograma do programa TRHUMIDADE.

É importante reforçar que o TRHUMIDADE foi elaborado em 1992, como uma ferramenta de análise do fenómeno de transferência de calor e humidade através das paredes dos edifícios, com inevitável atenção para a influência da interface entre camadas. Neste trabalho, contudo, o objetivo passa por analisar a influência dos valores das propriedades higrotérmicas dos materiais, que são necessárias como inputs do programa, de modo a categorizar aquelas onde é exigida uma maior precisão. Essa análise de sensibilidade será efetuada a partir do estudo do processo de absorção de água em dois materiais: o barro vermelho e o betão celular, pelo que não se considera a possibilidade de elementos com mais do que uma camada. Por este motivo, a sub-rotina MATINT presente no organograma da Figura 2 a tracejado, não será utilizada no algoritmo de cálculo do programa. Outro aspeto que importa desde já destacar, prende-se com as condições das ambiências estudadas neste trabalho. De facto, as simulações realizadas procuram reproduzir o que se passa em ambiente laboratorial (onde os valores experimentais forma obtidos), pelo que algumas sub-rotinas terão simplificações comparativamente a estudos que pretendam simular condições reais exteriores.

Nos subcapítulos que se seguem, é realizada uma descrição mais detalhada do programa, baseada na sequência de cálculo presente na Figura 2, dividindo-se essa análise em quatro grupos: dados de entrada,

introdução do efeito da radiação solar, interpolação dos coeficientes fenomenológicos e saída de resultados. Cada um dos grupos anteriores é apresentado primeiramente de forma genérica, revelando as potencialidades do programa, seguindo-se de uma abordagem mais contextualizada ao caso em estudo, apoiada na descrição das simulações que servirão de base à análise de sensibilidade realizada no capítulo 4. Assim, simultaneamente com a descrição do TRHUMIDADE é realizada a caracterização e justificação dos valores utilizados nas simulações de base.

#### 2.3.1.1. DADOS DE ENTRADA

A utilização do programa implica a introdução de um número elevado de dados, que seguindo o organograma da Figura 2 se organizam sequencialmente nos seguintes ficheiros:

- INTDADOS - referente à composição, período de tempo, características e orientação da parede;
- Base de dados com os coeficientes fenomenológicos, em função do teor de humidade e da temperatura:  $D_w(U, T)$ ,  $D_T(U, T)$ ,  $\lambda(U, T)$  e  $S(U, T)$ ;
- SOLIN e SOLIT - que incluem, respetivamente, o perfil inicial do teor de humidade e temperatura;
- METE - relativo às características climáticas ao longo do tempo.

Na Figura 3 apresenta-se um esquema pormenorizado com os dados a introduzir nos respetivos ficheiros, para a utilização do programa.

Como neste trabalho, se focará a transferência de humidade, por absorção de água, numa camada de material, com condições da envolvente que aproximem o mais possível as existentes em laboratório, o conhecimento de alguns parâmetros mencionados na Figura 3 deixa de ser necessário. Por exemplo, no ficheiro INTDADOS, apesar das datas de início e de fim da simulação serem indispensáveis para o cálculo do período total analisado, designado por RTOTH na Figura 2, estas deixam de ter um carácter tão determinante como nas análises em condições reais. De facto, as datas colocadas não precisam de estar concordantes com as alturas do ano onde a radiação solar ou o vento assumem um papel predominante, porque a influência desses parâmetros não será tida em conta. Também a latitude e longitude do lugar, orientação da parede e fluxo máximo transmitido na interface são dispensáveis. Um último esclarecimento em relação ao ficheiro INTDADOS, prende-se com os valores dos coeficientes de transferência superficial de humidade exterior e interior,  $\beta_e$  e  $\beta_i$ . A determinação experimental destes coeficientes reveste-se de alguma complexidade, tendo Vasco Freitas na sua tese de doutoramento compilado os resultados obtidos por Gertis, Darolles e Couasnet para estes parâmetros[1]. Nas simulações realizadas, utilizou-se o valor de  $\beta_e = \beta_i = 0,0003$  m/s, que o próprio autor do programa calculou a partir da relação entre o fluxo de secagem e a diferença de concentração do vapor de água à superfície do material e na ambiência, segundo a expressão (7). A utilização deste valor de  $\beta$  nas simulações efetuadas é importante para permitir comparar resultados numéricos e experimentais, como será apresentado no capítulo 5.

$$g = \beta [PS_{sup} \cdot HR_{sup} - PS_{amb} \cdot HR_{amb}] \quad (7)$$

No anexo 1 – dados de entrada: INTDADOS – apresentam-se os dois ficheiros utilizados nas simulações para as condições iniciais, simulações de base, para o barro vermelho e para o betão celular, onde é possível visualizar a estrutura e os valores dos parâmetros inseridos.

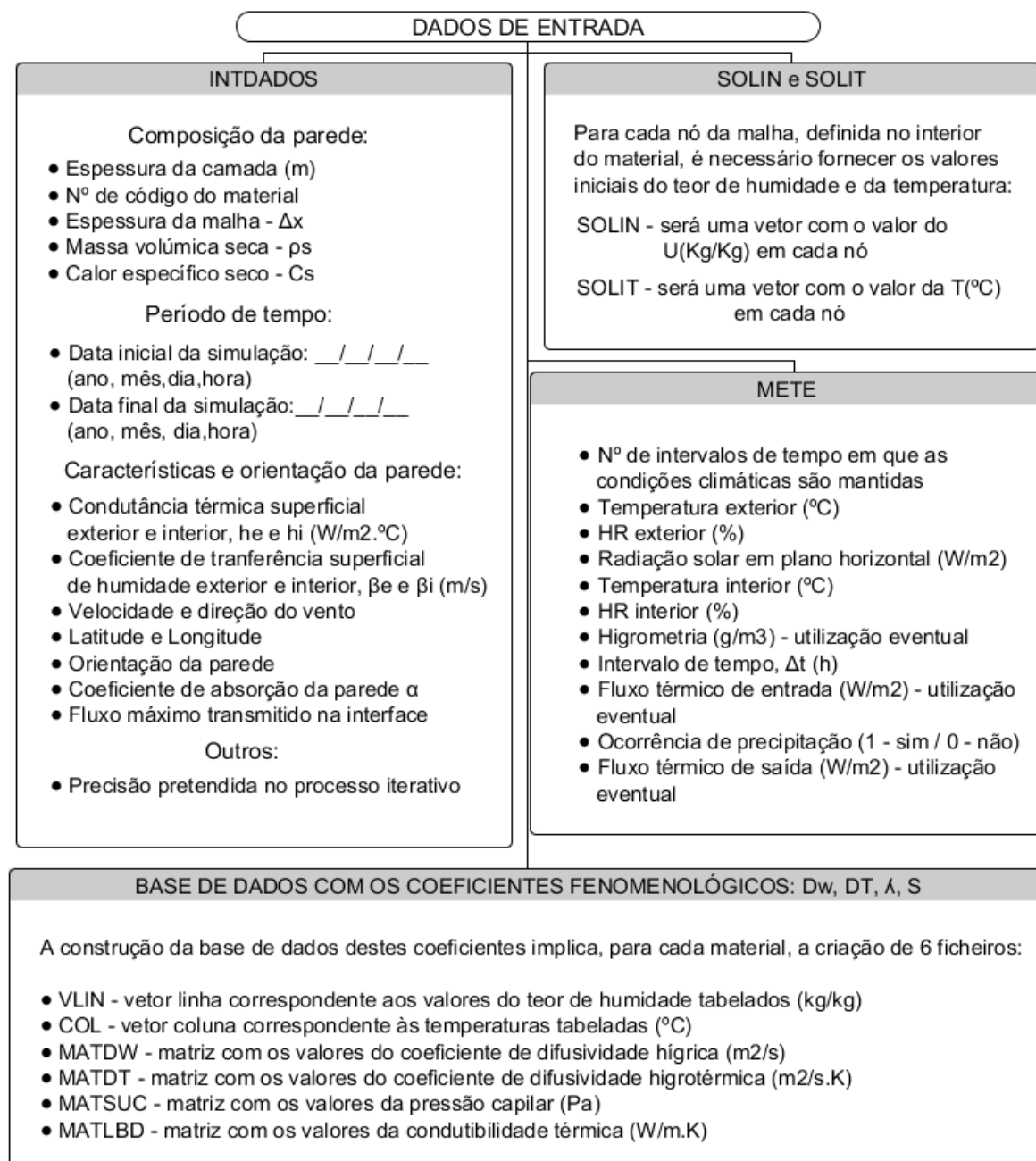


Figura 3 – Dados de entrada do programa.

Relativamente ao ficheiro correspondente aos dados climáticos – METE – é importante referir que é possível inserir valores da temperatura exterior, humidade relativa exterior e radiação solar compatíveis com um determinado clima em estudo, a partir dos dados fornecidos por estações meteorológicas, realizando-se as simulações em regime dinâmico, com as condições climáticas a variar em intervalos de tempo definidos,  $\Delta t$ (h). Uma fonte de imprecisão, quando se estuda condições climática reais, pode advir da forma como o programa contabiliza a precipitação. De facto, o TRHUMIDADE não permite inserir um determinado valor da chuva incidente, por exemplo em mm/h retirado de um ficheiro meteorológico, apresentando apenas a possibilidade de escolher entre ocorrer ou não precipitação (sim-1, não-0).

Quando se indica a existência de precipitação, o programa define que o valor do teor de humidade na face exterior dos elementos construtivos é igual ao teor de humidade de saturação. Nos estudos em regime dinâmico, cada vez que se efetua uma iteração no tempo, o programa realiza uma nova leitura das condições climáticas, como é visível no organograma presente na Figura 2. Nas simulações realizadas neste trabalho, as condições das ambiências exteriores e interiores são mantidas constantes, refletindo o que se passa em laboratório. O estudo do processo de absorção de água pelos materiais, implica considerar a precipitação como fonte de humidificação. No anexo 2 – dados de entrada: METE – é possível observar os dados climáticos para a simulação de base do barro vermelho e do betão celular, onde cada ficheiro é constituído apenas por uma linha, precisamente por se trabalhar em regime estacionário.

Complementarmente a estes dois ficheiros, é necessário fornecer o teor de humidade e a temperatura inicial do material (SOLIN e SOLIT), bem como criar uma base de dados com os coeficientes fenomenológicos acima indicados. Esses coeficientes fenomenológicos são fornecidos na forma matricial, em função do teor de humidade inserido no vetor VLIN e da temperatura introduzida no vetor COL. O programa ao atribuir um número de código a cada material, faz automaticamente a leitura dos vetores, VLIN e COL que estão associados às matrizes com os respetivos coeficientes: MATDW, MATDT, MATSUC e MATLBD. No anexo 3 – dados de entrada: SOLIN e SOLIT – apresentam-se os vetores com o teor de humidade e temperatura inicial ao longo do elemento construtivo, para as simulações de base com o barro vermelho e com o betão celular. Como se pode constatar, o teor de humidade e temperatura adotadas são constantes ao longo de todo o material. É ainda importante esclarecer, que os valores dos teores de humidade escolhidos para o barro e para o betão celular correspondem ao menor valor não nulo presente no vetor VLIN dos respetivos materiais. De facto, como se pretende simular o processo de absorção de água nesses elementos, considerou-se que o teor de humidade no início deveria ser muito reduzido. Por fim, no anexo 4 – dados de entrada: coeficientes fenomenológicos – apresentam-se as matrizes com os valores de  $D_w(U, T)$ ,  $D_T(U, T)$ ,  $\lambda(U, T)$  e  $S(U, T)$  característicos do barro vermelho e do betão celular. Os valores dos parâmetros apresentados, para os dois materiais estudados, não foram todos determinados experimentalmente por Vasco Freitas em 1992, atendendo ao grande esforço inerente à obtenção de algumas das propriedades. Na realidade apenas o coeficiente de difusividade hídrica,  $D_w$ , foi calculado pelo autor, que recorreu a valores disponíveis na bibliografia para os restantes parâmetros [1]. No capítulo 3, onde se estudou as propriedades necessárias ao programa, apresentam-se para os restantes parâmetros qual a bibliografia utilizada.

Apesar do elevado número de dados de entrada exigidos pelo TRHUMIDADE, a realização de simulações com o programa, em diferentes condições, apenas implica alterações pontuais nos ficheiros INTDADOS e METE, desde que esteja constituída a base de dados dos materiais. Neste momento, somente as propriedades do barro vermelho e do betão celular, estão disponíveis. Este facto, é mais um incentivo para a compilação das propriedades higrotérmicas de diferentes materiais necessárias ao programa, que é um dos objetivos traçados no capítulo 3.

#### 2.3.1.2. INTRODUÇÃO DO EFEITO DA RADIAÇÃO SOLAR

Em simulações onde se pretenda considerar condições climáticas reais, é preciso atender ao efeito da radiação solar sobre a temperatura superficial exterior da parede. Para atender a esse fenómeno, o programa calcula a temperatura fictícia ar-sol, através da sub-rotina SOL. Esse cálculo implica o conhecimento das seguintes propriedades: orientação da parede, latitude e longitude do lugar, hora do dia, direção e velocidade do vento e radiação solar incidente numa superfície horizontal. A introdução da radiação solar num plano horizontal em vez de vertical, deve-se exclusivamente ao facto de ser esse o tipo

de informação fornecida pelas estações meteorológicas. Contudo, como o programa foi criado para estudar a transferência de humidade em paredes, na sub-rotina SOL é efetuada automaticamente essa conversão.

Na Figura 4, descreve-se a forma como o TRHUMIDADE considera o efeito da radiação solar, evidenciando o processo de cálculo da concentração de vapor à superfície e no ambiente exterior, parâmetros necessários para a resolução das condições impostas nos nós em contacto com as ambiências. O cálculo da concentração de vapor à superfície,  $PS_{sup} \times HR_{sup}$  em  $\text{kg/m}^3$ , implica que a pressão de saturação seja calculada a partir da temperatura fictícia ar-sol recorrendo ao diagrama psicrométrico, enquanto a humidade relativa é obtida a partir das curvas de adsorção/desadsorção do material. Já a determinação da concentração de vapor exterior é conseguida a partir do conhecimento da humidade relativa e do cálculo da pressão de saturação, determinada com base na temperatura exterior através do diagrama psicrométrico. A temperatura fictícia da ambiência exterior é um artifício utilizado pelo programa para impor uma igualdade dos fluxos na superfície que separa o ar do sólido,  $q_1$  e  $q_2$ , respetivamente.

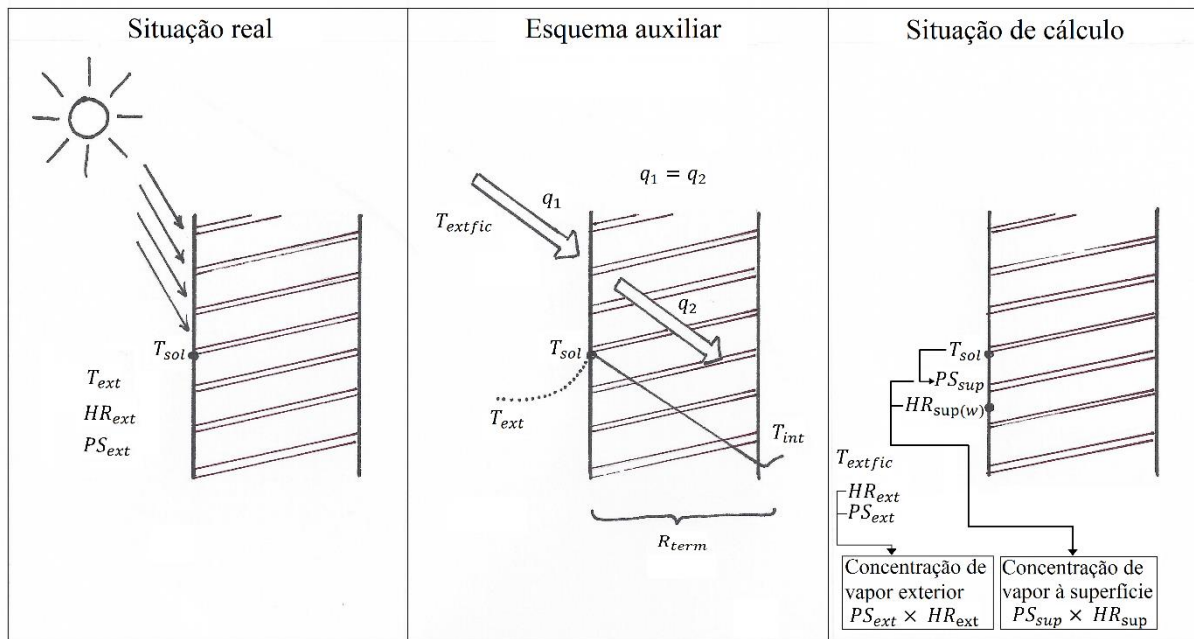


Figura 4 – Introdução do efeito da radiação solar no TRHUMIDADE[1]

A temperatura fictícia ar-sol –  $T_{sol}$  – é definida pela expressão (8), enquanto a temperatura fictícia da ambiência exterior –  $T_{extfic}$  – pode ser obtida, uma vez conhecida  $T_{sol}$ , a partir da equação (12), que resulta das equações (9), (10) e (11).

$$T_{sol} = T_{ext} + \alpha \cdot \frac{Rad}{he} \quad (8)$$

Sabendo que, o fluxo de calor é dado por (9), facilmente se obtém  $q_1$  e  $q_2$  pelas expressões (10) e (11).

$$q = \Delta T \cdot K \quad (9)$$

$$q_1 = (T_{extfic} - T_{sol}) \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{h_e}\right)} \quad (10)$$

$$q_2 = (T_{sol} - T_{int}) \cdot \frac{1}{(R_{term})} \quad (11)$$

Impondo  $q_1 = q_2$  resulta,

$$T_{extfic} = \frac{1}{h_e} \cdot \frac{(T_{sol} - T_{int})}{R_{term}} + T_{sol} \quad (12)$$

Em que,

$q$	– Fluxo de calor	[W/m <sup>2</sup> ]
$K$	– Coeficiente de transmissão térmica	[W/(m <sup>2</sup> .°C)]
$h_e$	– Condutância térmica superficial exterior	[W/(m <sup>2</sup> .°C)]
$R_{term}$	– Resistência térmica do elemento construtivo, incluindo a resistência térmica superficial	[(m <sup>2</sup> .°C)/W]

Apesar da radiação solar não intervir nas simulações realizadas no capítulo 4, a sub-rotina SOL continua a ser chamada no algoritmo do programa, armazenado variáveis indispensáveis para o processo de cálculo. Contudo, tal situação acarreta simplificações, tais como, por exemplo, a variável armazenada como temperatura fictícia ar-sol, não ser mais do que a temperatura da ambiência exterior.

### 2.3.1.3. INTERPOLAÇÃO DOS COEFICIENTES FENOMENOLÓGICOS

Outro aspeto fundamental na sequência de cálculo do programa, e indispensável para a linearização do sistema de equações (3) e (4), é o conhecimento dos valores dos coeficientes  $D_w$ ,  $D_T$ ,  $\lambda$  e  $S$  qualquer que seja o valor da temperatura e da humidade ( $U_j, T_j$ ). Como estes parâmetros são fornecidos na forma matricial, conforme apresentado nos anexos referidos em 2.3.1.1, o autor do programa viu-se obrigado a desenvolver um algoritmo de interpolação, criando a sub-rotina COFENOM. Para cada parâmetro, esta sub-rotina faz a leitura dos quatro valores tabelados do coeficiente fenomenológico, correspondentes a temperaturas e teores de humidade imediatamente superiores e inferiores aos pretendidos, como se ilustra na Figura 5. Em seguida, executa uma dupla interpolação linear, obtendo o valor final,  $C_{U_j, T_j}$ , de acordo com a expressão (13).

$$C_{U_j, T_j} = \frac{\left(\frac{C_a \cdot y_2 + C_c \cdot y_1}{y_1 + y_2}\right) \cdot x_2 + \left(\frac{C_b \cdot y_2 + C_d \cdot y_1}{y_1 + y_2}\right) \cdot x_1}{x_1 + x_2} \quad (13)$$



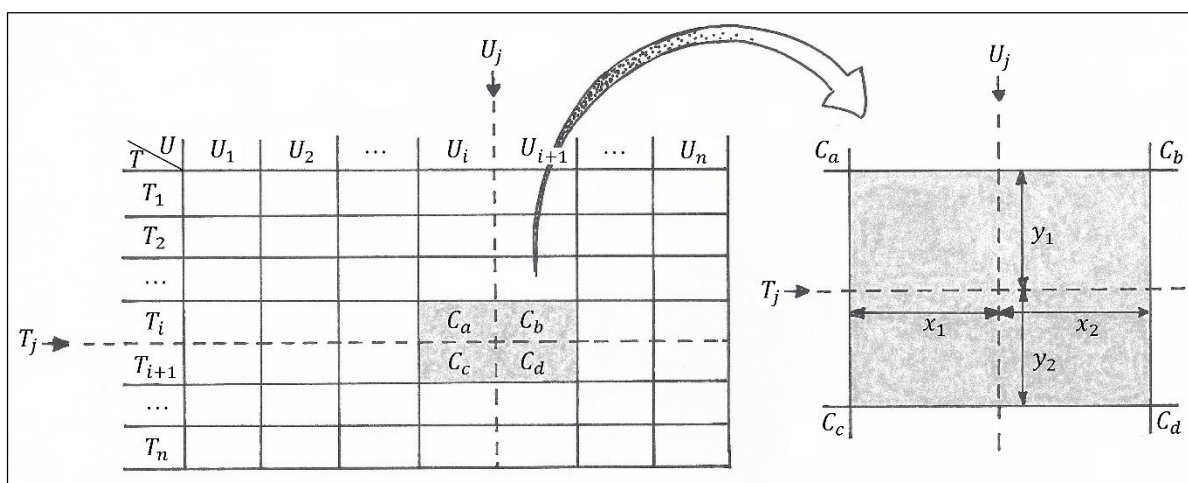


Figura 5 – Interpolação dos coeficientes fenomenológicos.

#### 2.3.1.4. SAÍDA DE RESULTADOS

O programa TRHUMIDADE permite obter os seguintes resultados:

- Perfis do teor de humidade e temperatura ao longo da espessura do material e em função do tempo,  $U(\chi, t)$  e  $T(\chi, t)$ ;
- Evolução da resistência térmica total do elemento de construção, em função do perfil do teor de humidade ao longo do tempo;
- Fluxos de humidade que atravessam a superfície de separação interior material-ar.

Na Figura 6, representa-se esquematicamente a estrutura do ficheiro de resultados, designado por RTH, onde é possível visualizar o tipo de informação gerada para a posterior criação das saídas gráficas. O excerto apresentado corresponde aos resultados de uma simulação para o betão celular, no primeiro e no último instante de tempo analisado (coluna 3). Evidentemente, que o período de 388 horas em causa é consequência das datas de início e fim da simulação introduzidas no ficheiro INTADADOS, assim como o intervalo de tempo definido para a malha temporal,  $\Delta t=0,1$  h colocado no ficheiro METE, condiciona a saída de resultados de 0,1 em 0,1 horas, isto é, de seis em seis minutos. A informação contida na coluna 2, apesar de não ter um significado físico, traduz a forma como o código do programa interpreta e organiza a informação da coluna 3. Se o menor intervalo de tempo possível de analisar é de 6 minutos, resultante da malha introduzida, então cada hora é dividida em 10 intervalos de tempo, o que acrescenta ao facto de o programa considerar o instante imediatamente inicial da simulação como o primeiro intervalo de tempo, permite compreender, por exemplo, que:  $388h \times 10 \text{ intervalos} + 1 = 3881$  intervalos (coluna 2). Na coluna 4 é visível a posição dos nós em que o elemento de betão celular, com 20cm de espessura, se encontra dividido. A distância entre nós é função da largura da malha, neste caso  $\Delta \chi=0,005$  m, escolhida no ficheiro INTDADOS. Assim, para cada instante é fornecido para todos os nós da malha: o teor de humidade, a temperatura e o fluxo de humidade na superfície interior, respetivamente nas colunas 5, 6 e 7.

1	2	3	4	5	6	7
5,000000	2,000000	0,100000	0,000000	0,520000	23,093000	-0,000032
5,000000	2,000000	0,100000	0,005000	0,364000	21,747000	-0,000032
5,000000	2,000000	0,100000	0,010000	0,114000	20,758000	-0,000032
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
5,000000	2,000000	0,100000	0,195000	0,012000	22,514000	-0,000032
5,000000	2,000000	0,100000	0,200000	0,016000	25,217000	-0,000032
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
1,000000	3881,000000	388,000000	0,000000	0,520000	25,000000	0,000013
1,000000	3881,000000	388,000000	0,005000	0,519000	25,000000	0,000013
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
1,000000	3881,000000	388,000000	0,195000	0,054000	25,000000	0,000013
1,000000	3881,000000	388,000000	0,200000	0,035000	25,000000	0,000013

Legenda,

1 – Número de iterações no mesmo instante  
2 – Número de intervalos de tempo considerados  
3 – Instante de tempo t (h)  
4 – Posição do nó em relação à superfície exterior (m)  
5 – Teor de humidade em (Kg/Kg)  
6 – Temperatura (°C)  
7 – Fluxo de humidade na superfície interior (Kg/m<sup>2</sup>.s)

Figura 6 – Excerto do ficheiro de resultados, RTH, para a simulação de base do betão celular.

É a partir dos resultados numéricos anteriormente explicitados que se obtêm saídas gráficas capazes de descrever a evolução do teor de humidade e da temperatura ao longo do elemento construtivo em diferentes instantes de tempo, bem como gráficos que descrevem a variação da resistência térmica em função da humidade dos materiais. Esta última opção não pode ser obtida diretamente a partir dos valores de saída contidos no ficheiro de resultados RTH, implicando pequenos cálculos complementares baseados nos perfis de teor de humidade em diversos instantes, que esquematicamente se tentam explicar na Figura 8. Para além dos resultados anteriores, o TRHUMIDADE permite ainda obter a representação gráfica dos fluxos de humidade que atravessam a superfície de separação interior material-ar, ao longo do tempo.

Apesar de no estudo de sensibilidade efetuado no capítulo 4 não se terem utilizado todas as potencialidades de saída, considerou-se importante mostrar esquematicamente o leque de resultados disponíveis a partir do programa. Nas figuras seguintes apresenta-se um esboço desses resultados, onde houve o cuidado que traduzissem com coerência o processo de absorção de água em análise.

Os resultados do lado esquerdo da Figura 7 permitem avaliar a progressão da frente húmida com o decorrer do processo de embebição, enquanto que no lado direito é visível a distribuição de temperaturas ao longo do provete, justificáveis por uma temperatura inicial do material inferior à temperatura das ambiências. Esta situação é idêntica à que acontece nas simulações efetuadas, onde o elemento construtivo apresenta uma temperatura inicial constante de 20°C e uma temperatura das envolventes exteriores e interiores de 25°C, assistindo-se a uma tendência para o equilíbrio da temperatura do material face à ambiência.

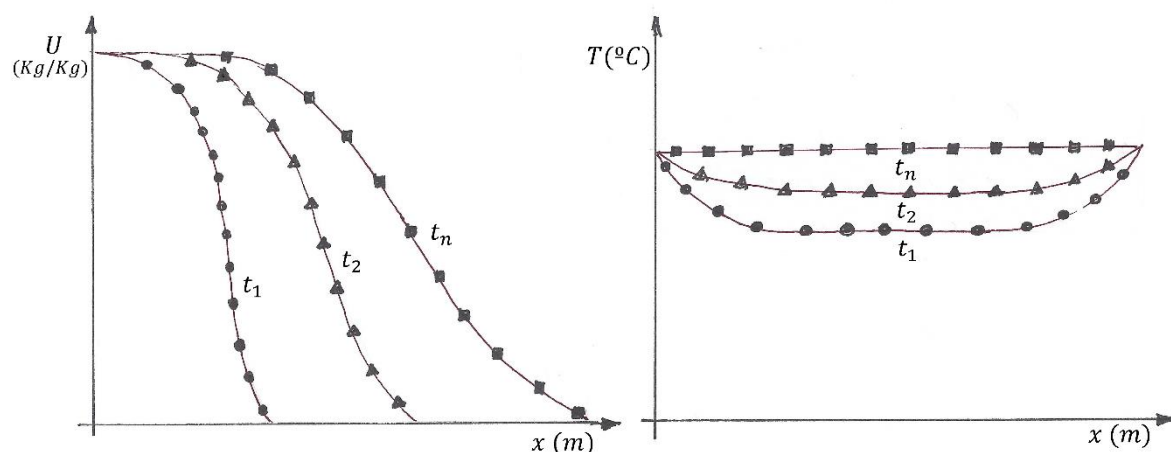


Figura 7 – Perfis de teor de humidade e temperatura ao longo do tempo.

Os valores do coeficiente de transmissão térmica -  $K$  - utilizados frequentemente em Engenharia Civil para avaliar o nível de isolamento térmico dos materiais de construção, encontram-se correntemente tabelados em função de coeficientes de condutibilidade térmica,  $\lambda$ , obtidos para teores de humidade no estado seco[1]. Contudo, em muitos materiais a condutibilidade térmica, e consequentemente a resistência térmica varia significativamente se os elementos de construção estiverem húmidos, o que pode explicar os desvios nos valores de  $K$  em relação ao esperado. Apesar de para já, o TRHUMIDADE não estar programado para obter diretamente a evolução da resistência térmica atendendo à influência da humidade, o gráfico presente no lado direito da Figura 8 pode ser facilmente obtido, seguindo a informação disponibilizada no lado esquerdo dessa mesma figura. De facto, conhecendo os perfis do teor de humidade em qualquer instante, para cada  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , representativos da espessura da malha em que o elemento é dividido, retira-se o valor médio do teor de humidade correspondente,  $U_1, U_2, \dots, U_n$ . Atendendo a que na base de dados dos materiais estão disponíveis os valores da condutibilidade térmica em função do teor de humidade, facilmente se efetua uma interpolação de modo a obter  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  concordantes com os teores de humidade pretendidos. Para cada um dos intervalos anteriores, calcula-se a respetiva resistência  $R_1, R_2, \dots, R_n$  através da expressão  $R = x(m)/\lambda$ , efetuando-se no final o seu somatório. Este procedimento é repetido para os diversos instantes,  $t_1, t_2, \dots, t_n$ , até se obter a representação gráfica da evolução da resistência térmica ao longo do tempo. Na Figura 8, optou-se por fazer uma representação esquemática característica do fenómeno de absorção de água em materiais porosos, pelo que a resistência térmica diminui à medida que a frente húmida progride. Vasco Freitas, na sua tese de doutoramento, demonstrou a diminuição e aumento registados pela resistência térmica, quando se submetia uma parede monolítica de betão celular a ciclos de embebição e secagem, respetivamente[1].

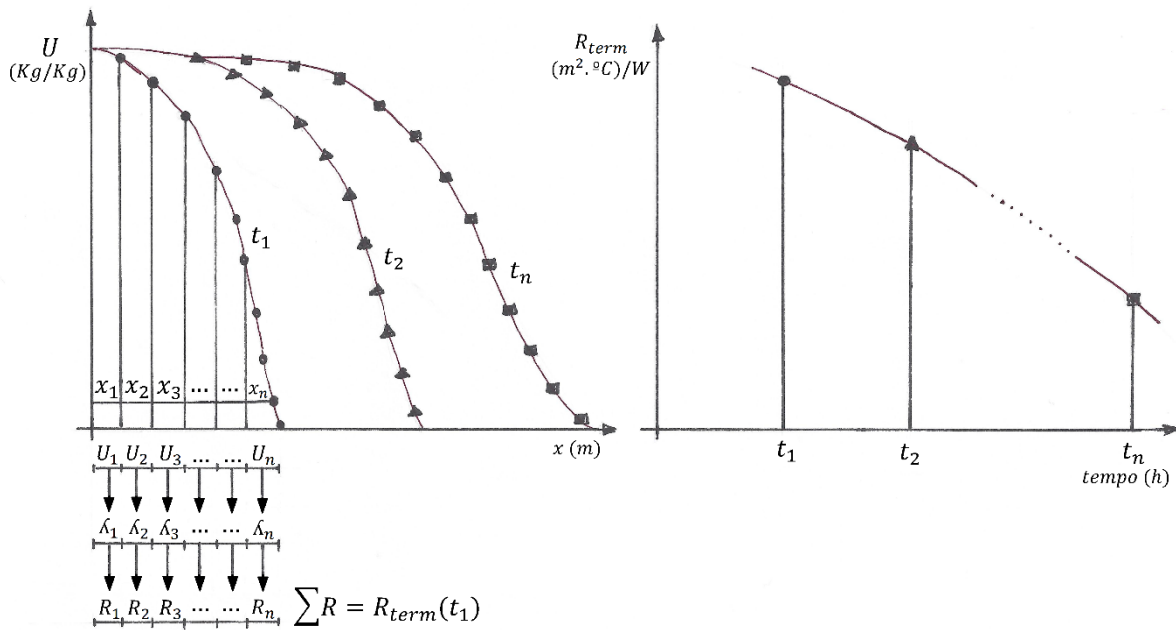


Figura 8 – Influência do teor de humidade na variação da resistência térmica.

Na Figura 9, esquematiza-se uma outra potencialidade do programa. Ainda que na forma de esboço, e sem preocupação com a escala ou com o próprio desenvolvimento da curva, é possível observar como é que o TRHUMIDADE interpreta o sentido dos fluxos que atravessam a superfície de separação interior do material com o ar.

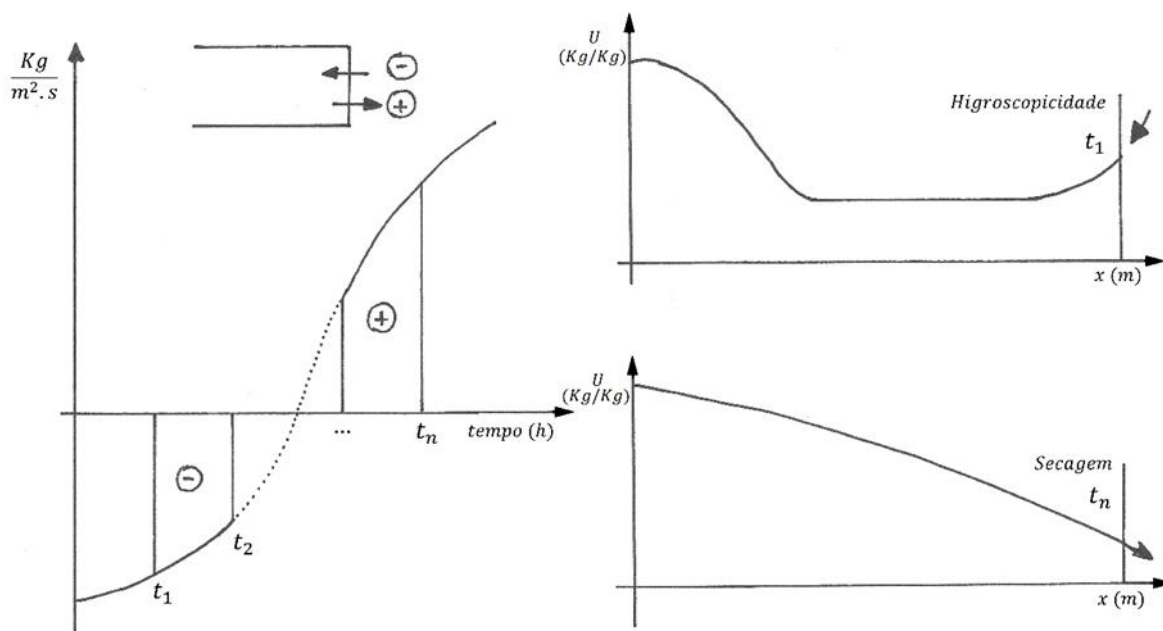


Figura 9 –Evolução dos fluxos de humidade que atravessam a superfície de separação material-ar, ao longo do tempo.

O esboço efetuado na Figura 9 vem no seguimento do excerto do ficheiro de resultados RTH, apresentado na Figura 6, onde na coluna 7 é visível que, para o primeiro instante de tempo o fluxo de humidade é negativo, enquanto na última hora analisada esse valor já é positivo. A explicação dos sentidos do fluxo e o sinal que lhes é atribuído pelo programa, encontra-se nos esquemas apresentados no lado direito da Figura 9. De facto, para o instante inicial,  $t_1$ , a frente húmida ainda não atingiu a face interior do elemento construtivo, e o equilíbrio com um ambiente onde a pressão de vapor é maior, implica a adsorção de moléculas de água do exterior, higroscopicidade. Por outro lado, no instante final,  $t_n$ , a frente húmida já atingiu o lado interior, implicando o equilíbrio com a envolvente onde a pressão de vapor é menor, a saída de moléculas de água, secagem. A representação dos fluxos de humidade em função do tempo, permite chegar a saídas gráficas como a presente no lado esquerdo da Figura 9.

Depois de elencadas todas as potencialidades gráficas que o programa fornece, importa esclarecer que a mais utilizada na análise de sensibilidade em processos de absorção de água efetuada no capítulo 4 corresponde ao perfil do teor de humidade, esquematicamente representado no lado direito da Figura 7. Por este motivo, na Figura 10 e na Figura 11 apresentam-se os resultados das simulações de base para o barro vermelho e para o betão celular, respetivamente, em função dos dados de entrada apresentados nos anexos do subcapítulo 2.3.1.1. São esses dois perfis que servirão de termo comparativo para as simulações efetuadas no capítulo 4, aquando do estudo de sensibilidade.

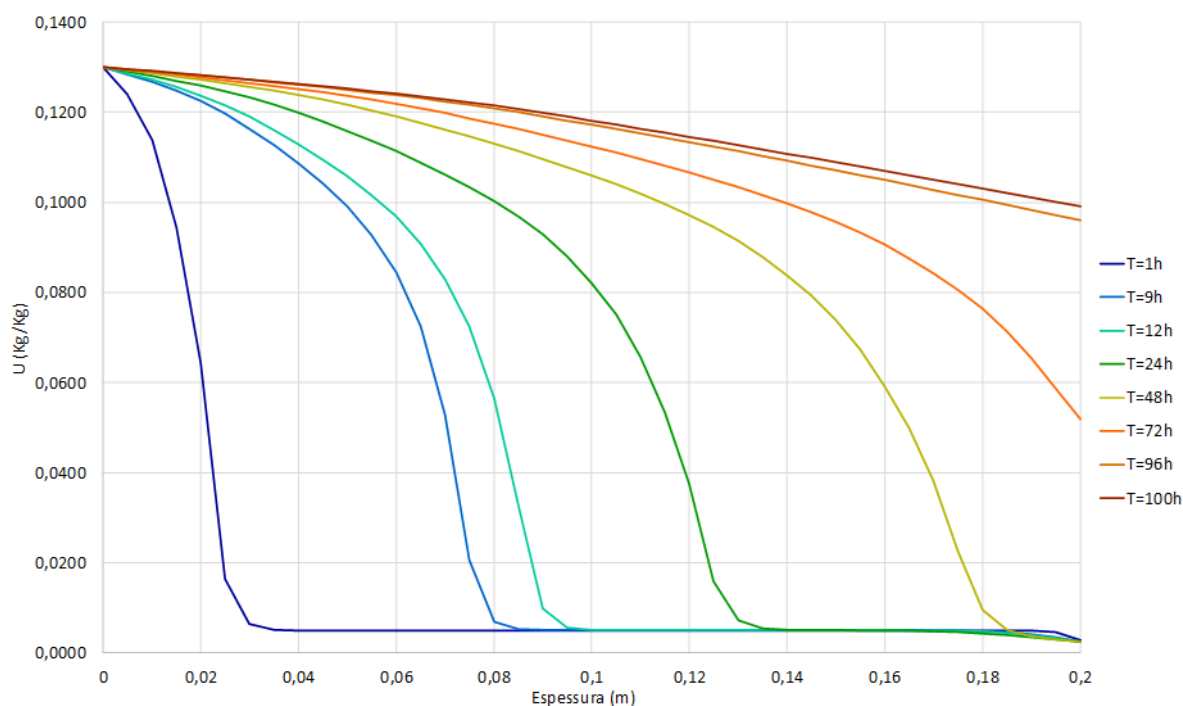


Figura 10 – Perfis do teor de humidade, ao longo do tempo, num elemento de barro vermelho.

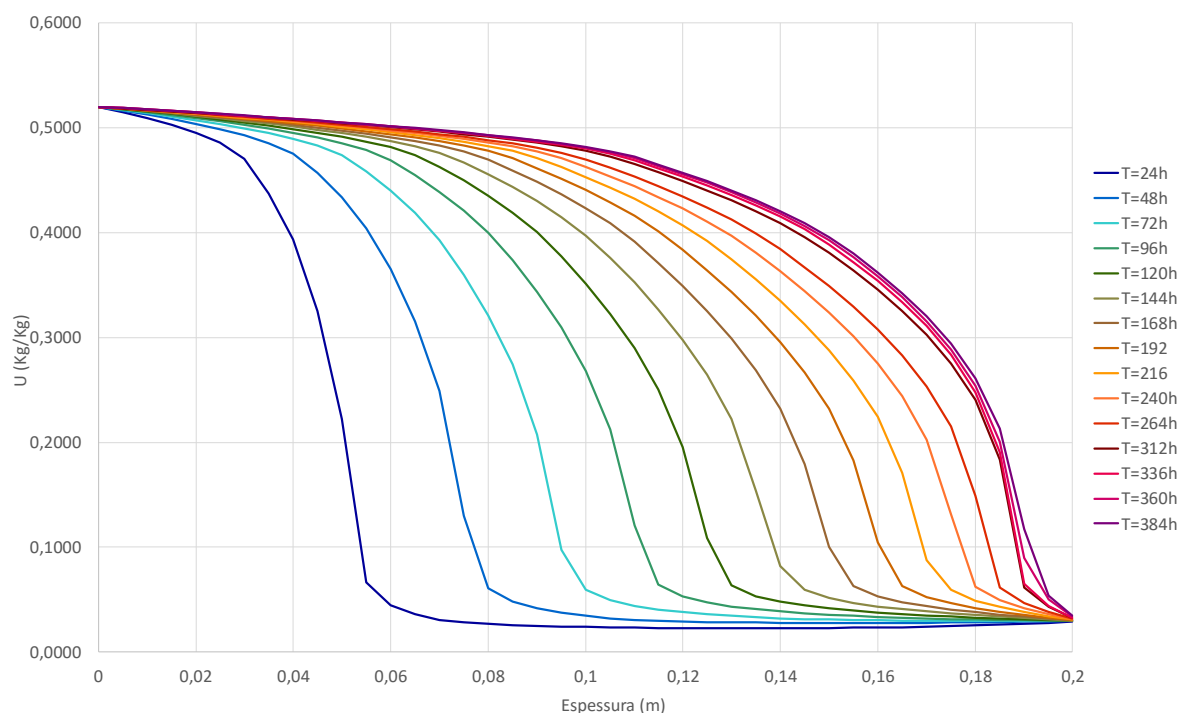


Figura 11 – Perfis do teor de humidade, ao longo do tempo, num elemento de betão celular.

Um dos aspetos que importa desde já esclarecer, prende-se com as horas seleccionadas para análise em cada um dos materiais. De facto, enquanto que para o barro vermelho o período de simulação introduzido no ficheiro INTDADOS é de aproximadamente 4 dias, para o betão celular esse período aumenta para 16 dias. Esta opção é compreendida atendendo a que no barro vermelho a humedificação do material é muito mais rápida. Assim, houve necessidade de estudar o processo de absorção de água nos dois materiais em horas diferentes, privilegiando no caso do barro vermelho a saída de resultados em intervalos de tempo menores para os instantes iniciais. Repare-se que ao fim de 24 horas, a frente húmida já atingiu aproximadamente 13 cm de espessura no barro vermelho, mas apenas penetrou 5,5 cm no betão celular. O facto de a água líquida apenas alcançar a superfície interior do barro vermelho e não alcançar a superfície interior do betão celular nada tem a ver com o período de simulação adotado para este. Isto é, por mais que se prolongasse no tempo o processo de absorção de água no betão celular, o domínio capilar não seria atingido na face interior, atendendo às condições das ambiências adotadas. Este facto, foi testado por simulações onde se aumentou o tempo de embebição até às 15 semanas, equivalente a 2520 horas, sem que se registasse progressões da frente húmida capazes de atingir a face interior do elemento. Uma possível explicação para este fenómeno reside nas condições das ambiências adotadas nas chamadas simulações de base, nomeadamente a HR interior de 50%, onde aparentemente o fenómeno de secagem no betão equilibra a água proveniente do exterior, verificando-se uma estabilização da frente húmida por mais que se estenda o tempo de absorção, como é visível no anexo 5 – Aumento do tempo de simulação no betão celular, para as condições de base. Assim, apesar de inicialmente, a análise de sensibilidade elaborada no capítulo 4 se destinar apenas a testar a influência das variações nas propriedades dos materiais, necessárias à execução do programa, mantendo constantes as condições das ambiências definidas nas simulações de base, sentiu-se também necessidade, em alguns casos, de alterar essas condições de modo a clarificar melhor a influência das propriedades nos resultados obtidos.

O estudo do processo de absorção de água pelos materiais, implica considerar no programa, como fonte de água líquida, a precipitação. Assim, na superfície exterior do barro vermelho e do betão celular, os perfis da Figura 10 e Figura 11, partem do teor de humidade de saturação, respetivamente  $U_{sat} = 0,13 \text{ kg/kg}$  e  $U_{sat} = 0,52 \text{ kg/kg}$ .

## 2.4. SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo apresentou-se e sintetizou-se a seguinte informação:

- O modelo matemático que está na base do programa TRHUMIDADE foi estabelecido por *Luikov e Philip – De Vries*, permitindo o estudo simultâneo da transferência de calor e humidade;
- A resolução numérica do sistema de equações diferenciais de *Luikov e Philip – De Vries*, adotada no TRHUMIDADE, utiliza a temperatura e o gradiente do teor de humidade como potenciais de transferência;
- O programa TRHUMIDADE, escrito em *Fortran 77*, resolve o sistema de equações de transferência de calor e humidade pelo método das diferenças finitas, através da discretização do elemento construtivo numa grelha com nós, nos quais o sistema de equações diferenciais é resolvido;
- Caracterização dos dados de entrada necessários à execução do programa e dos possíveis resultados de saída, apresentando-se simultaneamente os ficheiros utilizados no barro vermelho e no betão celular para as simulações de base, e os respetivos resultados dos perfis de embebição, utilizados como referência para as análises de sensibilidade elaboradas no capítulo 4.





# 3

## CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E HIGROTÉRMICAS NECESSÁRIAS À EXECUÇÃO DO TRHUMIDADE

### 3.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo pretende-se efetuar a caracterização das oito propriedades físicas e higrotérmicas necessárias como dados de entrada ao programa de cálculo TRHUMIDADE, incluindo os procedimentos experimentais utilizados na obtenção de cada propriedade, referências a normas de ensaio adotadas e um pequeno levantamento de valores disponíveis na literatura para cada um dos parâmetros. Embora tratando-se de um trabalho de pesquisa limitado no tempo e profundidade, reveste-se de uma enorme importância, pretendendo-se categorizar as propriedades onde na literatura se encontram com relativa facilidade valores tabelados, apontando simultaneamente o grau de complexidade de obtenção de cada parâmetro. Esta informação é fundamental, uma vez que os resultados obtidos em cada simulação com o programa TRHUMIDADE, e a respetiva fiabilidade, dependerão diretamente do rigor dos dados de entrada inseridos. Devido à confrontação com múltiplas designações e simbologias, na literatura consultada para as várias propriedades, adotou-se a terminologia proposta pela comissão CIB W040[5], onde foi efetuada uma compilação dos parâmetros de transferência de calor, ar e humidade com o intuito de se obter uma linguagem universal. Neste capítulo pretende-se ainda contribuir para a criação de uma base de dados para o programa TRHUMIDADE, compilando para os materiais de construção com informação disponível, os inputs necessários numa forma próxima à exigida pelo programa, através da elaboração de fichas para cada material. Uma dificuldade à construção dessa base de dados foi a falta de informação relativa a algumas propriedades exigidas pelo programa, mas que atualmente são pouco utilizadas, como é exemplo o  $D_T$ .

### 3.2. MASSA VOLÚMICA SECA

A massa volúmica seca de um material é dada pela relação entre o peso do material seco e o seu volume aparente (volume total), sendo designada pelo símbolo  $\rho_0$  e expressa em  $\text{kg/m}^3$ , calculada de acordo com a expressão (14).

$$\rho_0 = \frac{m_{seco}}{V_{total}} \quad (14)$$

No sistema de equações diferenciais que está na base do programa de cálculo TRHUMIDADE, é utilizada a massa volúmica equivalente do material, que é função do seu teor de humidade, podendo ser determinada a partir da massa volúmica seca de acordo com a seguinte expressão [1]:

$$\rho^* = \rho_0 + U \cdot \rho_0 = \rho_0(1 + U) \quad (15)$$

Em que,

$\rho^*$	– Massa volúmica equivalente	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_0$	– Massa volúmica seca	[kg/m <sup>3</sup> ]
$U$	– Teor de humidade	[kg/kg]

Para a determinação experimental da massa volúmica seca, os provetes deverão ser secos em estufa, a uma temperatura dependente do material em análise, até que estes atinjam uma massa constante, de acordo com a EN ISO 12570 [6]. A obtenção do volume implica a medição das dimensões do provete, em milímetros, sendo necessário pelo menos três leituras para cada dimensão seguindo-se do cálculo da respetiva média aritmética. O volume dos provetes é assim calculado com base no valor médio das dimensões obtidas.

Na Tabela 1 e na Tabela 2, encontram-se, respetivamente, algumas normas relativas ao processo de determinação desta propriedade bem como valores encontrados na literatura referentes a diferentes materiais.

Tabela 1 – Normas de ensaio relativas à determinação da massa volúmica seca.

Norma	Descrição	Domínio de Aplicação
NP-616, 1973	Determinação da massa volúmica	Madeiras
NP EN 323,2002	Determinação da massa volúmica	Placas de derivados de madeira
NP EN 12390 – 7,2009	Determinação da massa volúmica	Betão endurecido
NP EN ISO 10545 – 3, 2001	Determinação da absorção de água, da porosidade aberta, da densidade relativa aparente e da massa volúmica global	Pavimentos e revestimentos cerâmicos
NP EN ISO 1183 – 2, 2015	Determinação da massa volúmica	Materiais plásticos não celulares
NP EN 1602, 2015	Determinação da massa volúmica aparente	Produtos de isolamento térmico para aplicação em edifícios
NP EN ISO 2811-1, 2012 - pt	Determinação da massa volúmica. Parte 1- método do picnómetro	Tintas e vernizes

Tabela 2 – Valores de  $\rho_0$  encontrados na literatura, para diferentes materiais porosos.

Material	Massa volúmica seca, $\rho_0$ (kg/m <sup>3</sup> )	Fonte / autor:
Betão	Densidade média	[1800-2200]
	Alta densidade	2400
	-	[2250-2270]
	Celular	525
Gesso	Projetado	[600-1500]
	Em painel	900
	-	[1245-1250]
	-	J.C.Marechal, K. Kiessl, K.Gertis [3]
Pedra calcária	Extra macia	1600
	Macia	1800
	Semi-dura	2000
	Dura	2200
	Extra dura	2600
	-	2155
	-	Isabel Torres [8]
Madeira	Contraplacado (painéis)	[300-1000]
	Fibra (painéis)	480
	Pinho	420
Poliestireno	Expandido	[10-50]
	-	10,3
	Extrudido	[20-65]
Poliuretano	Espuma rígida	[28-55]
	-	31,9
Lã de vidro	-	77
Argamassa	-	1800
	-	1685
Barro vermelho	-	1925

### 3.3. CALOR ESPECÍFICO DO MATERIAL SECO

O calor específico do material seco é a quantidade de calor necessária para fazer variar de 1 grau a temperatura da unidade de massa de uma determinada substância, sendo designado pelo símbolo  $C_0$ , expresso em J/(kg.K). Esta propriedade depende da massa do corpo, da diferença de temperatura a que o material é sujeito, bem como da natureza do material. No caso dos sólidos a sua variação com a temperatura não é importante [8].

Atendendo a que o calor específico é também uma propriedade variável com o teor de humidade, para materiais que apresentem estabilidade química face à água, essa variação é traduzida pela seguinte expressão, tida em conta no programa TRHUMIDADE [1]:

$$C^* = (C_0 + C_w \cdot U) / (1 + U) \quad (16)$$

Em que,

$C^*$	– Calor específico equivalente	[J/kg.K]
$C_0$	– Calor específico do material seco	[J/kg.K]
$C_w$	– Calor específico da água, considerado 4180 J/(Kg.K) no TRHUMIDADE [9]	[J/kg.K]
$U$	– Teor de humidade	[kg/kg]

O princípio de ensaio habitualmente utilizado é designado por método das misturas. Este método assenta no “princípio da igualdade das trocas de calor” segundo o qual: a quantidade de calor libertada pelos corpos que arrefecem é igual à quantidade de calor recebida pelos corpos que aquecem, quando estes se encontram isolados termicamente do meio exterior [10]. O teste prevê a utilização de água como fluido calorimétrico a uma temperatura média de 60°C (variação de 20°C a 100°C) e a secagem dos provetes em estufa a uma temperatura compreendida entre 102°C e 120°C. O método das misturas consiste em adicionar uma dada massa de material a elevada temperatura, a uma dada massa de água a baixa temperatura. A temperatura de equilíbrio resultante da junção dos dois materiais deve ser determinada. Calculando o calor absorvido pela água e pelo recipiente, e igualando o seu valor à expressão da quantidade de calor libertada, é possível obter o calor específico pretendido. Este método é habitualmente utilizado em materiais de isolamento térmico, onde o calor específico é uma propriedade essencial no caso de serem utilizados sob condições de fluxo de calor variável ou transitório [11].

Na norma ASTM C 351 -92b encontra-se a descrição do procedimento experimental relativo à determinação do calor específico de elementos de isolamento térmico. Na Tabela 3, apresentam-se os valores de  $C_0$  encontrados na literatura referentes a diferentes materiais porosos.

Tabela 3 – Valores de  $C_0$ , encontrados na literatura, para diferentes materiais porosos.

Material	Calor específico do material seco, $C_0$ (J/kg.K)	Fonte / autor:
Betão	Densidade média	1000
	Alta densidade	1000
	-	940
	Celular	1050
Gesso	Projetado	1000
	Em painel	1000
	-	840

Material	Calor específico do material seco, $C_0$ (J/kg.K)	Fonte / autor:
Pedra calcária	Extra macia	1000
	Macia	1000
	Semi-dura	1000
	Dura	1000
	Extra dura	1000
Madeira	Contraplacado (painéis)	EN 12524 [7]
	Fibra (painéis)	S.Hokoi, G. Horie, T. Ikeda [3]
Poliestireno	Expandido	1450
		EN 12524 [7]
		1380
Poliuretano	Extrudido	J.C. Marechal [3]
		1450
		EN 12524 [7]
Lã de vidro	Espuma rígida	EN 12524 [7]
	-	1400
Barro vermelho		J.C. Marechal [3]
	-	1400
		800
		J.C. Marechal [3]
		920
		Bernard Perrin [1]

### 3.4. POROSIDADE

A porosidade define-se como sendo a razão entre o volume total de vazios (poros e canais) e o volume total do material sólido, sendo designado pelo símbolo  $\xi$  ou  $\psi$ , expresso em  $\text{m}^3/\text{m}^3$  ou em %, respetivamente. A maior parte dos materiais de construção apresenta porosidade aberta, com poros que comunicam entre si e com a superfície através de cavidades e canais. Nestes casos, a transferência de água no interior é muito mais célere comparativamente a elementos onde os poros não estão interligados – porosidade fechada [12]. A porosidade pode ser determinada de diversas formas, elencando-se de seguida, dois dos processos mais habituais.

Um dos processos de ensaio, baseia-se na pesagem do material em diversas situações. Os provetes começam por ser secos em estufa até à estabilização da sua massa ( $m_1$ ), sendo posteriormente colocados num recipiente onde a pressão é reduzida, de modo a eliminar todo o ar existente nos vazios do material. De seguida faz-se penetrar água lentamente no mesmo recipiente, mantendo-se o vazio durante a entrada da água, por um período de um dia. Passado esse tempo, os provetes são mantidos imersos durante 24 horas, à pressão atmosférica, efetuando-se a respetiva pesagem hidrostática ( $m_2$ ). Rapidamente os provetes são retirados da água e secos, com a ajuda de um pano húmido, determinando-se a sua massa quando ainda estão saturados ( $m_3$ ) [11]. A porosidade será então obtida através da expressão (19).

$$\xi = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \quad (17)$$

Outro processo corrente, para a determinação da porosidade, implica a utilização de um aparelho denominado porosímetro de mercúrio. A técnica do ensaio consiste em injetar um líquido não molhante, como o mercúrio, nos poros do material. Sendo o líquido não molhante, torna-se necessário aplicar alguma pressão para o fazer penetrar nos poros, que é tanto maior quanto menor for o diâmetro dos mesmos. A realização de pequenos incrementos de pressão, acompanhados da quantificação do volume de mercúrio inserido em cada acréscimo, permite traçar uma curva capaz de relacionar volume/pressão e que pode ser facilmente convertida numa curva que correlacione volume/dimensão dos poros através da equação de *Washburn* [8]. Assim, este método permite obter a porosidade a partir da expressão (18), bem como possibilita conhecer o raio dos poros, que estão a ser preenchidos a cada instante, através da pressão aplicada e da já referida equação de *Washburn*.

$$\xi = \frac{V_a + V_l}{V_{sol}} \quad (18)$$

Em que,

$V_a$	– Volume da fase gasosa	[m <sup>3</sup> ]
$V_l$	– Volume da fase líquida	[m <sup>3</sup> ]
$V_{sol}$	– Volume da fase sólida	[m <sup>3</sup> ]

A utilização deste processo para a determinação da porosidade acarreta, contudo, alguns inconvenientes [11]:

- As altas pressões, muitas vezes necessárias, podem danificar os poros mais finos;
- O valor da tensão superficial do mercúrio pode variar em função da presença de impurezas;
- É possível uma variação no ângulo de contacto do mercúrio.

Esta técnica de ensaio foi a adotada por *Vasco Freitas* [1] para a determinação da porosidade e porometria do barro vermelho e do betão celular, bem como por *Isabel Torres* [8] no caso da argamassa e da pedra, nas respetivas teses de doutoramento. Os valores obtidos por estes autores fazem parte da recolha bibliográfica presente na Tabela 5. Na Tabela 4, elencam-se algumas normas de ensaio relativas à determinação desta propriedade.

Tabela 4 – Normas de ensaio relativas à determinação da porosidade.

Norma	Descrição	Domínio de Aplicação
NF B 10-503.ASTM C 20:2000	Determinação da porosidade	Tijolos refratários
NP EN ISO 10545 – 3:2001	Determinação da porosidade	Pavimentos e revestimentos cerâmicos

Tabela 5 – Valores da  $\xi$ , encontrados na literatura, para diferentes materiais porosos.

Material	Porosidade $\xi$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Fonte / autor:
Betão	-	<i>J.C.Marechal</i> [3]
	celular	<i>Vasco Freitas</i> [1]

Material		Porosidade $\xi$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Fonte / autor:
Pedra calcária	-	0,197	Isabel Torres [8]
Madeira	Fibra (painéis)	0,65	J.C.Marechal [3]
Poliestireno	Expandido	0,99	J.C. Marechal [3]
Poliuretano	-	0,96	J.C. Marechal [3]
Lã de vidro	-	0,89	G. Humbert, Crausse [3]
Argamassa		0,264	Isabel Torres [8]
Barro vermelho	-	0,28	Vasco Freitas [1]

### 3.5. CURVA HIGROSCÓPICA

A higroscopicidade de um material é um parâmetro que caracteriza a sua capacidade de fixar água por adsorção e de a restituir ao ambiente em que se encontra, em função das variações de temperatura e de pressão parcial de vapor de água do meio. Quanto maior for a higroscopicidade de um material, maior quantidade de humidade será adsorvida e restituída [13]. O fenómeno da higroscopicidade é atribuído às forças intermoleculares de *Van der Waals*, podendo ser representado graficamente pela Figura 12.

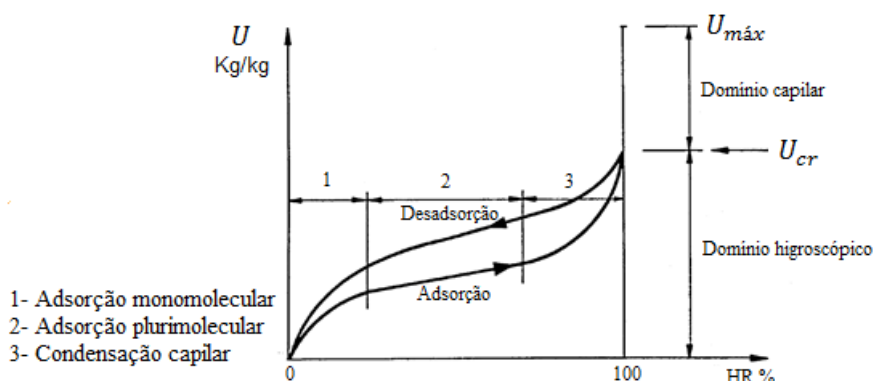


Figura 12 – Comportamento higroscópico de materiais de construção em função da humidade relativa (adaptado de Freitas, 1992) [1]

De uma forma simplificada, pode-se dizer que os materiais higroscópicos são materiais que uma vez colocados num ambiente com uma determinada HR e temperatura caminham para um estado de equilíbrio com o meio circundante, isto é, a pressão de vapor de água nos poros do material, com o decorrer do tempo, iguala a do ar envolvente. Os materiais correntemente utilizados em Engenharia Civil são materiais higroscópicos [14]. Contudo, o domínio higroscópico limita apenas uma gama de teores de humidade, da totalidade que o material pode apresentar. Na Figura 13 encontra-se uma descrição convencional dos diferentes teores de humidade de referência de um elemento poroso.

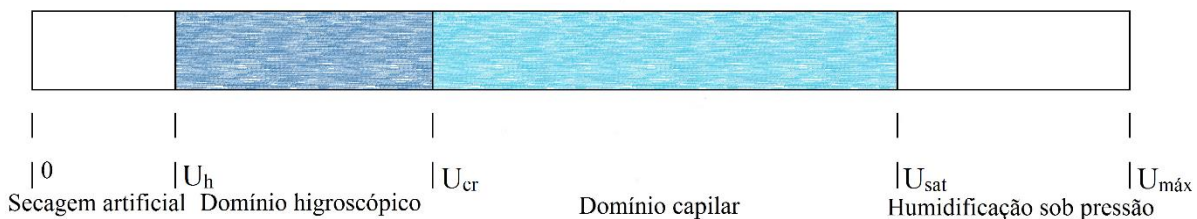


Figura 13 – Descrição convencional dos teores de humidade de referência de um material poroso.

Pode-se assim sintetizar-se, que [12]:

- **O teor de humidade higroscópico -  $U_h$**  – pode variar entre o zero absoluto, caso o material esteja em contacto com uma ambiência de humidade relativa nula, e o teor de humidade crítico.
- **O teor de humidade crítico -  $U_{cr}$**  – corresponde ao teor de humidade que um material apresenta quando em contacto com uma ambiência saturada, teoricamente concomitante com uma HR=100%. Acima deste valor o transporte de água é feito predominantemente por capilaridade.
- **O teor de humidade de saturação -  $U_{sat}$**  – representa a quantidade de água existente num material devido ao contacto com um plano de água por um dado período de tempo.
- **O teor de humidade máximo -  $U_{max}$**  – define-se como sendo o teor de humidade do material, quando todo o volume não ocupado pelo esqueleto sólido da estrutura porosa está preenchido por água. Na prática, este valor dificilmente é atingido devido à existência de ar aprisionado no elemento.

Para caracterizar a higroscopicidade dos materiais, o TRHUMIDADE necessita que seja introduzida a curva que relaciona a HR da ambiência com o teor de humidade higroscópico de cada elemento, o que em inglês se designa por *sorption isotherms*. Teores de humidade superiores ao crítico também terão de ser evidentemente fornecidos ao programa, mas não como propriedades de entrada do material para a execução do TRHUMIDADE. Esses valores serão incluídos no vetor VLIN de cada material, em função dos quais as propriedades dependentes do teor de humidade são definidas.

A relação entre o teor de humidade higroscópico e a humidade relativa pode assumir diferentes formas, que foram categorizadas em 5 grupos por *Brunauer, Emmet e Teller*, conforme se apresenta na Figura 14 [14]. A fixação do teor de humidade em materiais de construção porosos é maioritariamente representada por curvas higroscópicas do tipo II, caracterizadas pela sua forma em “S”.

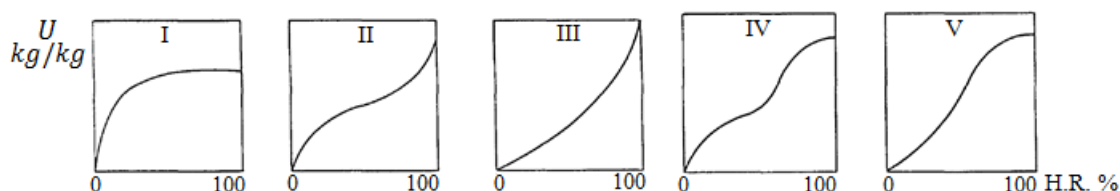


Figura 14 – Diferentes tipos de curvas higroscópicas (adaptado de Hansen,1986) [14]

Atendendo ao formato mais comum de uma curva higroscópica e por análise da Figura 12 é frequente dividir-se o processo de adsorção em 3 fases. Numa primeira fase e para baixos valores da HR ocorre a fixação de uma camada de moléculas de água na superfície interior dos poros – adsorção monomolecular. Quando todas as superfícies dos poros ficam cobertas por uma camada de moléculas de água, inicia-



se a deposição de novas camadas umas sobre as outras – adsorção plurimolecular. A última fase corresponde à condensação capilar, que ocorre quando o diâmetro dos poros é suficientemente pequeno, conduzindo a uma junção das camadas plurimoleculares [12].

Na Figura 12 é ainda possível distinguir o comportamento diferenciado dos materiais em adsorção e desadsorção, evidenciando o fenómeno de *histereses*. Quando o programa TRHUMIDADE foi desenvolvido em 1992, as curvas de adsorção/desadsorção dos materiais eram necessárias para determinar a humidade relativa à superfície de um material durante o processo de secagem, entrando num dos procedimentos da sub-rotina MATAMB. Contudo, o estudo desenvolvido na altura para o barro vermelho e para o betão celular conduziu o autor a adotar uma função única para a adsorção/desadsorção, desprezando o fenómeno de *histereses*. Esta simplificação foi aliás corroborada por resultados obtidos noutros materiais por diversos autores [1]. Apesar das curvas de desadsorção resultarem teoricamente do equilíbrio estabelecido durante um processo de secagem, e as curvas de adsorção serem fruto do equilíbrio estabelecido durante a embebição, são ainda muitas as questões associadas ao fenómeno de *histereses* que não estão completamente resolvidas. De facto, as curvas de adsorção e desadsorção encontradas na literatura podem assumir diferentes formas, quer provocadas pela interrupção do processo de adsorção (percurso ABC), quer resultantes da interrupção do fenómeno de desadsorção (percurso DEF), como é visível na Figura 15. Às curvas ABC e DEF representadas é atribuído o nome de *scanning curves*. Assim, na realidade, as curvas higroscópicas em adsorção/desadsorção podem assumir um número infinito de formas entre os dois extremos teóricos. Por todas estas razões, quando o programa TRHUMIDADE foi reescrito manteve-se a adoção de uma curva única “média” entre a adsorção/desadsorção para caracterizar o domínio higroscópico. Além disso, recorda-se que uma das limitações inerentes à teoria de *Philip-De Vries*, apontadas no subcapítulo 2.2.1.1, passava precisamente por não ser possível contabilizar o fenómeno de *histereses*.

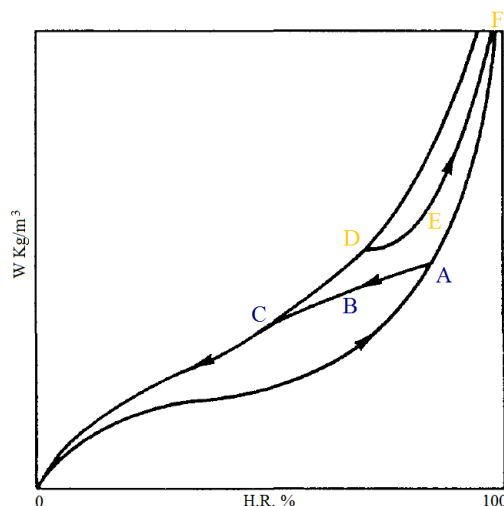


Figura 15 – Esboço de curvas que traduzem a relação entre o teor de humidade higroscópica e a H.R., resultantes da interrupção do processo de adsorção ou desadsorção.

Acrescenta-se que também a temperatura tem alguma influência na variação do teor de humidade em função da humidade relativa. Temperaturas mais elevadas conduzem a uma mais fácil libertação das moléculas de água, pelo que para uma mesma humidade relativa o teor de humidade diminui à medida que a temperatura aumenta. No entanto, ensaios experimentais realizados sobre diversos materiais por diferentes autores têm demonstrado que as curvas higroscópicas em adsorção/desadsorção são pouco sensíveis à temperatura do ensaio. Exemplo disso são os resultados obtidos por *Krischer* referidos em

[14], onde se demonstra a pequena variação das curvas de desadsorção para o caso da madeira, quando a temperatura passa de 20°C para 80°C (Figura 16). À razão anterior recorda-se e acrescenta-se, que a teoria de *Philip-De Vries*, que está na base do programa TRHUMIDADE não considera os fenómenos de congelamento, ebulição ou degelo pelo que a análise dos materiais deve estar compreendida entre 4°C e 99°C. Por tudo isto, no TRHUMIDADE despreza-se o efeito da variação da temperatura nas curvas de adsorção/desadsorção no domínio higroscópico.

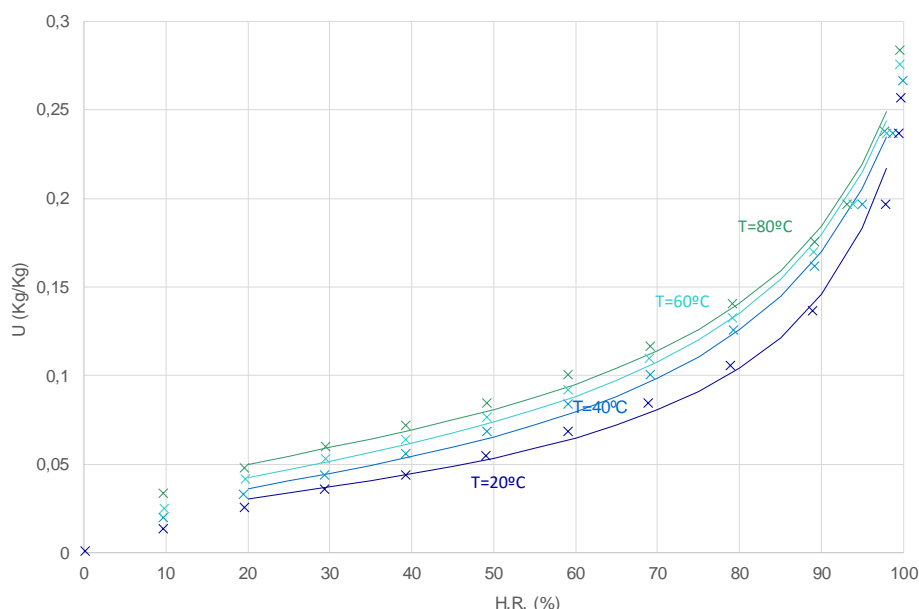


Figura 16 – Influência da temperatura na curva de desadsorção da madeira, resultados obtidos por *Krischer* [14]

As curvas de adsorção/desadsorção podem ser obtidas através da colocação sucessiva dos provetes em ambientes com diferentes humidades relativas, conseguidos através de soluções salinas específicas. Quando o equilíbrio em cada ambiente é atingido, ou seja, quando se alcança estabilidade da massa, o teor de humidade é determinado por pesagem, numa balança de alta precisão [12]. No caso das curvas de adsorção, as amostras são inicialmente secas em estufas (HR=0%), sendo colocadas posteriormente numa série de ambientes, com a humidade relativa a aumentar em patamares, até por exemplo à solução salina de nitrato de potássio (HR=94,6%), registando-se a massa do material sempre que o equilíbrio amostra/ambiente seja alcançado. No mínimo, são necessários quatro “ambientes” diferentes dentro do intervalo de humidade relativa em estudo[11]. O traçado da curva de adsorção é consequência do cálculo do teor de humidade higroscópica para cada uma das humidades relativas analisadas. A obtenção das curvas de desadsorção seguem um processo em tudo semelhante ao indicado na determinação das curvas de adsorção, apenas por uma ordem inversa. Assim, neste caso, inicia-se o método para uma humidade relativa de 94,6% que vai baixando até à secagem dos provetes. Um dos aspetos a salvaguardar prende-se com o facto de que para humidades relativas superiores a 95%, esta técnica não se aplica, uma vez que pequenos acréscimos da humidade relativa se repercutem em grandes aumentos no teor de humidade. Na verdade, a maior variação do teor de humidade, ocorre nas proximidades da humidade relativa de saturação, pelo que para esses valores torna-se necessário recorrer ao “prato de pressão” [12], a mesma técnica utilizada para obter as curvas de sucção capilar.

O método das soluções salinas, descrito anteriormente e preconizado na EN ISO 12571:2000, foi utilizado por *Vasco Freitas* para obter as curvas de adsorção/desadsorção do barro vermelho e do betão



Material		Curva higroscópica		Fonte / autor:	
Gesso	$\rho_0 = 1245 \text{ Kg/m}^3$ $\xi = - \text{m}^3/\text{m}^3$	Adsorção		<i>J.C.Marechal, [3]</i>	
		HR[–]	U [kg/kg]		
		0	0		
		0,7	0,00044		
		0,8	0,00308		
		0,9	0,0065		
		0,95	0,01		
0,9992	0,032				
Pedra calcária	$\rho_0 = 2155 \text{ Kg/m}^3$ $\xi = 0,197 \text{m}^3/\text{m}^3$	Adsorção		<i>Isabel Torres [8]</i>	
		HR [–]	U [kg/kg]		
		0	0		
		0,04	0,000242		
		0,112	0,000275		
		0,348	0,000405		
		0,586	0,000484		
		0,763	0,000574		
		0,800	0,000619		
		0,842	0,000735		
0,921	0,001314				
Madeira	Fibra (painéis) $\rho_0 = 2155 \text{ Kg/m}^3$ $\xi = 0,197 \text{m}^3/\text{m}^3$	Desadsorção		<i>J.C. Marechal [3]</i>	
		HR [–]	U [kg/kg]		
		0,921	0,001923		
		0,842	-		
		0,800	-		
		0,763	0,001095		
		0,586	0,000756		
		0,348	0,000575		
		0,112	0,000534		
		0,04	0,000442		
		0	0		
		Poliestireno	Expandido $\rho_0 = 10,3 \text{ Kg/m}^3$ $\xi = 0,99 \text{m}^3/\text{m}^3$		
HR[–]	U [kg/kg]				
0	0				
0,1	0,002				
0,2	0,003				
0,3	0,0039				
0,4	0,0046				
0,5	0,0058				
0,6	0,0073				
0,7	0,0090				
0,8	0,0113				
0,9	0,0138				
0,98	0,0170				

Material		Curva higroscópica		Fonte / autor:			
Poliuretano	-	$\rho_0 = 31,9 \text{ Kg/m}^3$ $\xi = 0,96\text{m}^3/\text{m}^3$	Adsorção		J.C. Marechal [3]		
			HR[-]	U [kg/kg]			
			0	0			
			0,1	0,00143			
			0,2	0,00257			
			0,3	0,00357			
			0,4	0,00477			
			0,5	0,00628			
			0,6	0,0080			
			0,7	0,01029			
			0,8	0,01314			
			0,9	0,01629			
0,99	0,01943						
Lã de vidro	-	$\rho_0 = 77,0 \text{ Kg/m}^3$ $\xi = 0,89\text{m}^3/\text{m}^3$	Adsorção		G. Humbert [3]		
			HR[-]	U [kg/kg]			
			0	0			
			0,1	0,00016			
			0,2	0,00039			
			0,3	0,00068			
			0,4	0,001			
			0,5	0,00129			
			0,6	0,00157			
			0,7	0,00179			
			0,8	0,00214			
			0,9	0,0030			
0,99	0,0050						
Argamassa	-	$\rho_0 = 1685 \text{ Kg/m}^3$ $\xi = 0,264 \text{ m}^3/\text{m}^3$	Adsorção		Isabel Torres [8]		
			Desadsorção				
			HR [-]	U [kg/kg]		HR [-]	U [kg/kg]
			0	0		0,921	0,019857
			0,04	0,001189		0,842	-
			0,112	0,002262		0,800	-
			0,348	0,003828		0,763	0,009979
			0,586	0,005816		0,586	0,008061
			0,763	0,007845		0,348	0,006676
			0,800	0,008390		0,112	0,005862
			0,842	0,009794		0,04	0,004427
			0,921	0,018155		0	0
Barro vermelho	-	$\rho_0 = 1925 \text{ Kg/m}^3$ $\xi = 0,280/\text{m}^3$	Adsorção		Vasco Freitas* [1]		
			Desadsorção				
			HR [-]	U [kg/kg]		HR [-]	U [kg/kg]
			0	0		1,00	-
			0,12	-		0,93	0,007
			0,33	0,003		0,86	0,004
			0,54	0,003		0,75	0,004
			0,75	0,004		0,54	0,004
			0,86	0,004		0,33	0,002
			0,93	0,005		0,12	0,002
			1,00	0,009		0	0

Material		Curva higroscópica				Fonte / autor:
Tijolo	<div> <div>-</div> <div> <math>\rho_0 = 1680 \text{ Kg/m}^3</math>  <math>\xi = 0,40/m^3</math> </div> </div>	Adsorção		Desadsorção		<div>Ahlgren, Lennart</div> <div>[14]</div>
		HR [-]	U [ <i>kg/kg</i> ]	HR [-]	U [ <i>kg/kg</i> ]	
		0,249	0,0017	0,950	0,0094	
		0,251	0,0022	0,952	0,0078	
		0,456	0,0022	0,798	0,0057	
		0,461	0,0032	0,803	0,0047	
		0,657	0,0030	0,604	0,0044	
		0,655	0,0035	0,608	0,0034	
		0,852	0,0033	0,403	0,0034	
		0,849	0,0038	0,402	0,0027	
		0,953	0,0038	0,199	0,0021	
		0,956	0,0044	0,202	0,0016	
0,982	0,0051					
0,986	0,0059					

**\*Nota:** Apesar da grande dificuldade experimental em manter uma HR contante acima dos 95-98%, de modo a determinar o teor de humidade crítico associado à HR de 100%, as curvas de adsorção/desadsorção propostas por *Vasco Freitas*, apresentam valores do teor de humidade correspondentes a uma ambiência 100% saturada, o que não acontece com as curvas obtidas por outros autores. Para esclarecer qualquer contradição que esta situação possa suscitar, é importante referir que os valores do  $W_{cr}=0,20\text{kg/kg}$  e  $W_{cr}=0,009\text{kg/kg}$ , para o betão celular e para o barro vermelho respetivamente, foram valores que o autor convencionou, por serem necessários de introduzir no TRHUMIDADE.

### 3.6. DIFUSIVIDADE HÍGRICA

A difusividade é o principal mecanismo que descreve o transporte de água no estado líquido nos meios porosos. Embora o transporte de água no estado líquido seja basicamente um fenómeno convectivo, no contexto da física dos edifícios, é suficientemente preciso considera-lo como um fenómeno de difusão. A razão principal de tal consideração deve-se ao facto do transporte de água líquida reproduzir corretamente o aumento linear da quantidade de líquido absorvido através da raiz quadrada do tempo [15]. Assim, o coeficiente de difusividade higríca define-se como o parâmetro que liga o gradiente médio do teor de humidade ao fluxo médio de humidade (na fase líquida ou de vapor), em regime isotérmico (19). Designa-se pelo símbolo  $D_w$  e expressa-se em  $\text{m}^2/\text{s}$ .

$$g_w = -D_w(w) \cdot \text{grad } w \quad (19)$$

Em que,

$g_w$	– Fluxo médio de humidade	[kg/m <sup>2</sup> s]
$D_w(w)$	– Coeficiente de difusividade higríca	[m <sup>2</sup> /s]
$w$	– Teor de humidade	[kg/m <sup>3</sup> ]

A difusividade higríca é um parâmetro fundamental das equações de transferência de humidade, variável com a temperatura e principalmente com o teor de humidade. Depende não só do material, mas também das condições de fronteira. O seu cálculo pode ser efetuado através dos perfis do teor de humidade, medidos sucessivas vezes ao longo do tempo, após o início do processo de absorção de água ou a partir da redistribuição quando o processo de absorção é interrompido. Os dois métodos mais comuns para

determinar  $D_w(w)$  a partir do conhecimento dos perfis de humidade são: o Método da Transformação de Boltzman e o Método dos Perfis.

No Método da Transformação de Boltzman, representado na Figura 17, os perfis do teor de humidade medidos em diferentes instantes são transformados num único perfil tipo utilizando a variável de Boltzman  $[U = \chi/\sqrt{t}]$  [8]. Como o teor de humidade apenas depende da variável de Boltzman, a integração de  $U$  entre o teor de humidade mínimo ( $W_1$ ) e o teor de humidade ( $W_2$ ), conduz à seguinte expressão (20) para o coeficiente de difusividade higríca:

$$D_w(w_2) = -\frac{1}{2 \frac{\partial w}{\partial U}} \cdot \int_{w_1}^{w_2} U dw \quad (20)$$

Nessa expressão,  $W$  é o teor de humidade expresso em ( $\text{kg/m}^3$ ) e  $U$  é a variável de Boltzman em ( $\text{m/s}^{1/2}$ ). Acrescenta-se que a adoção do método de Boltzman no cálculo de  $D_w(w)$  só permite a utilização de perfis de absorção do teor de humidade [16].

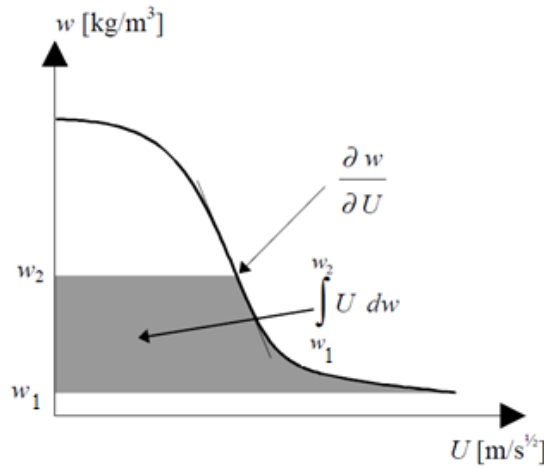


Figura 17 – Princípio do cálculo de Boltzman [16]

No caso do Método dos Perfis, o cálculo da difusividade higríca pode ser obtida quer a partir de perfis medidos durante o processo de absorção, como durante o processo de redistribuição do teor de humidade [16]. Este método utiliza dois perfis de humidade nos momentos  $t$  e  $t+dt$ , como é visível na Figura 18, representando  $x=0$  a superfície do provete em contacto com a água. A quantidade de humidade transportada através da secção da amostra, no comprimento  $x_0$ , a partir da face do provete em contacto com a superfície líquida, no período de tempo  $dt$ , encontra-se representada pela área sombreada nessa mesma figura.

O coeficiente de difusividade higríca pode assim ser expresso em função de uma curva média do perfil de humidade entre os dois perfis medidos, como indica a expressão (21).

$$D_w(w) = -\frac{1}{dt} \cdot \frac{\int_{x=x_0}^{x=l} [w_{t+dt}(x) - w_t(x)] dx}{\frac{\partial w_0}{\partial x_0}} \quad (21)$$

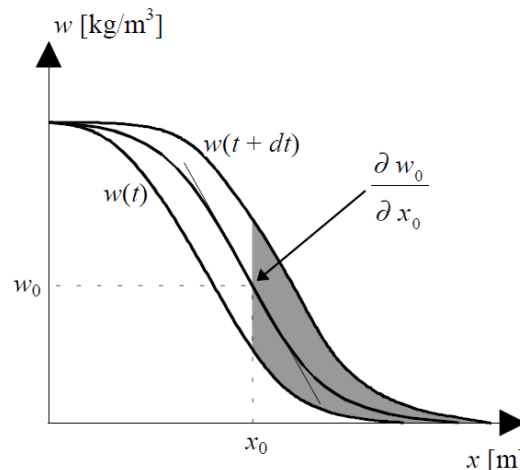


Figura 18 – Princípio de cálculo pelo método dos perfis [16]

A determinação de  $D_w$ , de acordo com qualquer um dos dois métodos apresentados, torna necessário o conhecimento dos perfis do teor de humidade em diferentes instantes de tempo. São várias as técnicas disponíveis de determinação destes perfis, apresentando-se seguidamente algumas delas.

- **Método gravimétrico:** é o método mais simples e preciso. Consiste em retirar uma amostra do material, a qual é pesada antes e após o processo de secagem, permitindo calcular por diferença de massa a quantidade de água contida no interior do material. Apresenta como desvantagem o facto de implicar a destruição do provete, para além do corte dos materiais produzir um certo aquecimento com consequentes alterações na distribuição de humidade inicial [11].
- **Métodos elétricos:** a medição do teor de humidade passa por analisar a sua influência na resistência ou impedância de um circuito elétrico colocado no interior do material poroso. É uma técnica que implica uma complexa instrumentalização do provete, mas apresenta como vantagem ser um método não destrutivo, onde o teor de humidade pode ser determinado ao longo do tempo de forma dinâmica e o provete pode ser reutilizado[11].
- **Método da condutibilidade térmica:** o aumento da condutibilidade térmica com o acréscimo do teor de humidade, permite determinar a distribuição de humidade na amostra. Destaca-se, contudo, que é difícil determinar a condutibilidade térmica de materiais húmidos, pois o gradiente de temperaturas que é necessário impor para efetuar a medição provoca a migração da humidade, como é explicado mais pormenorizadamente em 3.8. Apesar de se tratar de um método não destrutivo, é uma técnica que não permite a obtenção do teor de humidade de modo contínuo [11].
- **Método baseado na atenuação de raios gama –  $\gamma$ :** de uma forma muito simplificada, o princípio de funcionamento desta técnica consiste na emissão, a partir de uma fonte radioativa, de fótons gama, que ao atravessarem o material com determinada espessura sofrem uma atenuação, permitindo conhecer o teor de humidade do material. Vários documentos contêm informação mais detalhada sobre os procedimentos e expressões que este método envolve, assim como recomendações e resultados experimentais obtidos, de que são exemplos a tese de licenciatura de Marten Janz em 1997 [16] e a tese de doutoramento de Vasco Freitas em 1992 [1]. Apresenta-se como uma técnica não destrutiva, que permite a medição dos teores de humidade de forma quase contínua acompanhada por resultados de boa precisão. Contudo, o equipamento utilizado tem um custo elevado, para além do próprio método exigir a adoção de várias simplificações que podem conduzir a alguns erros [11].



- **Método da ressonância magnética (N.M.R.):** trata-se de um método não destrutivo, onde o número de núcleos de hidrogénio é contado. O princípio do método passa por aplicar um campo magnético permanente exterior, que quando perpendicular ao campo magnético constante, é responsável pela absorção de alguma energia. A quantidade de energia absorvida é proporcional ao número de núcleos de hidrogénio, constituindo uma medida do teor em água do material testado. Apesar do equipamento necessário para esta técnica ser dispendioso, é possível obter uma elevada precisão nos teores de humidade medidos, bem como uma resolução no espaço superior a 1mm. Segundo alguns autores, esta técnica oferece uma sensibilidade superior ao método baseado na atenuação dos raios gama, apresentado a vantagem acrescida de nenhuma radiação radioativa ser envolvida no processo [16].

Após a apresentação anterior, facilmente se compreende que a determinação da difusividade hídrica a partir do conhecimento dos perfis de teor de humidade é um processo complexo e dispendioso. Outra forma de obter esse parâmetro sem recorrer aos perfis de teor de humidade, implica o conhecimento do coeficiente de absorção de água,  $A_w$ , e do teor de humidade de saturação,  $W_{sat}$ , encontrando-se convenientemente explicado na tese de doutoramento de Künzle (1995) [17], que sugere a expressão (22) para a determinação de  $D_w$ .

$$D_w = 3,8 \times \left( \frac{A_w}{W_{sat}} \right)^2 \times 1000 \left( \frac{W}{W_{sat}} \right)^{-1} \quad (22)$$

Em que,

$A_w$	– Coeficiente de absorção de água	[kg/m <sup>2</sup> .s <sup>1/2</sup> ]
$W$	– Teor de humidade	[kg/m <sup>3</sup> ]
$W_{sat}$	– Teor de humidade de saturação	[kg/m <sup>3</sup> ]

Um exemplo muito conhecido onde se aplica esta técnica para a obtenção da difusividade hídrica, é utilizado no programa de simulação WUFI, em que o pequeno número de materiais para os quais esta propriedade é conhecida tornou necessário estima-la a partir de outros parâmetros de mais direta determinação, como é o caso de  $A_w$  e do  $W_{sat}$  [15].

A importância de  $D_w$  na modelização da transferência de humidade, é motivo de muitos estudos sobre as diferentes técnicas de obtenção desta propriedade. Kumaran em 1999, num estudo intitulado *Moisture diffusivity of building materials from water absorption measurements* [18], confirmou a simplificação da obtenção da difusividade hídrica, a partir do coeficiente de absorção de água e do teor de humidade de saturação, uma vez que concluiu que os resultados eram muito próximos dos obtidos pelo método dos raios gama. Um outro aspeto a ter em atenção com o método por atenuação de radiação gama, prende-se com a pequena precisão que apresenta para baixos teores de humidade. Esta foi aliás a razão que levou Isabel Torres [8] a calcular  $D_w$  recorrendo à expressão (22) para o estudo da humidade ascensional, atendendo à grande importância que a fase higroscópica assume nesse âmbito.

Na Tabela 7, apresentam-se valores da difusividade hídrica em função do teor de humidade, para diversos materiais.

Tabela 7 – Valores de  $D_w$ , encontrados na literatura, para diferentes materiais porosos.

Material	Difusividade hídrica, $D_w$ ( $m^2/s$ )		Fonte / autor:
Betão	U [ $kg/kg$ ]	$D_w$ [ $m^2/s$ ]	K. Kiessl, K.Gertis [3]
	0	$1,444 \times 10^{-11}$	
	0,0022	$1,444 \times 10^{-11}$	
	0,0044	$1,445 \times 10^{-11}$	
	0,0066	$1,445 \times 10^{-11}$	
	0,0088	$1,454 \times 10^{-11}$	
	0,011	$1,564 \times 10^{-11}$	
	0,013	$6,259 \times 10^{-11}$	
	0,0154	$17,48 \times 10^{-11}$	
	0,0176	$26,91 \times 10^{-11}$	
	0,0198	$27,89 \times 10^{-11}$	
	0,022	$28,868 \times 10^{-11}$	
	0,0242	$28,872 \times 10^{-11}$	
	0,0264	$28,877 \times 10^{-11}$	
	0,0286	$28,880 \times 10^{-11}$	
	0,0308	$28,885 \times 10^{-11}$	
	0,033	$28,890 \times 10^{-11}$	
	U [ $kg/kg$ ]	$D_w$ [ $m^2/s$ ]	Curva pertencente à base de dados do TRHUMIDADE, valores obtidos por Vasco Freitas[1]
	0,011	$8,06 \times 10^{-08}$	
	0,016	$6,27 \times 10^{-08}$	
	0,031	$8,90 \times 10^{-09}$	
	0,062	$1,44 \times 10^{-09}$	
	0,158	$5,39 \times 10^{-10}$	
	0,272	$5,20 \times 10^{-09}$	
	0,388	$1,16 \times 10^{-08}$	
	0,472	$2,72 \times 10^{-08}$	
	0,500	$9,84 \times 10^{-08}$	
Gesso	U [ $kg/kg$ ]	$D_w$ [ $m^2/s$ ]	Bomberg [3]
	0	$4,170 \times 10^{-10}$	
	0,02	$4,170 \times 10^{-10}$	
	0,04	$5,060 \times 10^{-10}$	
	0,06	$1,181 \times 10^{-09}$	
	0,08	$2,780 \times 10^{-09}$	
	0,1	$1,101 \times 10^{-09}$	
	0,12	$4,440 \times 10^{-10}$	
	0,14	$3,480 \times 10^{-10}$	
	0,16	$3,240 \times 10^{-10}$	
	0,18	$3,120 \times 10^{-10}$	
	0,2	$3,010 \times 10^{-10}$	
	0,22	$2,890 \times 10^{-10}$	
	0,24	$2,780 \times 10^{-10}$	
	0,26	$2,988 \times 10^{-10}$	
	0,28	$3,170 \times 10^{-10}$	
	0,30	$3,590 \times 10^{-10}$	
	0,32	$8,430 \times 10^{-10}$	
	0,34	$2,467 \times 10^{-09}$	
	0,36	$5,686 \times 10^{-09}$	

Material		Difusividade hídrica, $D_w$ (m <sup>2</sup> /s)		Fonte / autor:
Madeira	Fibra (painéis)	U [kg/kg]	$D_w$ [m <sup>2</sup> /s]	S.Hokoi, G.Horie, T.Ikeda [3]
		0	-	
		0,01	$8,553 \times 10^{-10}$	
		0,02	$2,632 \times 10^{-10}$	
		0,03	$0,877 \times 10^{-10}$	
		0,04	$0,439 \times 10^{-10}$	
		0,05	$0,439 \times 10^{-10}$	
		0,06	$0,658 \times 10^{-10}$	
		0,07	$1,096 \times 10^{-10}$	
		0,08	$1,754 \times 10^{-10}$	
		0,09	$2,961 \times 10^{-10}$	
		0,10	$4,276 \times 10^{-10}$	
		0,11	$5,702 \times 10^{-10}$	
		0,12	$7,127 \times 10^{-10}$	
		0,13	$8,772 \times 10^{-10}$	
		0,14	$9,430 \times 10^{-10}$	
		0,15	$7,895 \times 10^{-10}$	
		0,16	$4,386 \times 10^{-10}$	
Poliestireno	Expandido	U [kg/kg]	$D_w$ [m <sup>2</sup> /s]	R.Fauconnier, B.Flor- ence, A.Laugier [3]
		0	$2,500 \times 10^{-10}$	
		0,1	$1,700 \times 10^{-09}$	
		0,2	$8,000 \times 10^{-10}$	
		0,3	$4,500 \times 10^{-10}$	
		0,4	$2,500 \times 10^{-10}$	
		0,5	$1,800 \times 10^{-10}$	
		0,6	$1,200 \times 10^{-10}$	
		0,7	$1,000 \times 10^{-10}$	
		0,8	$1,000 \times 10^{-09}$	
		0,9	$5,000 \times 10^{-09}$	
		1,0	$1,200 \times 10^{-08}$	
		1,1	$2,500 \times 10^{-08}$	
		1,2	$2,000 \times 10^{-08}$	
		1,3	$1,000 \times 10^{-08}$	
		1,4	$5,000 \times 10^{-09}$	
		1,5	$3,000 \times 10^{-09}$	
Poliuretano	-	U [kg/kg]	$D_w$ [m <sup>2</sup> /s]	R.Fauconnier, B.Flor- ence, A.Laugier [3]
		0	$4,000 \times 10^{-09}$	
		0,05	$5,000 \times 10^{-10}$	
		0,10	$2,500 \times 10^{-10}$	
		0,15	$1,600 \times 10^{-10}$	
		0,20	$1,100 \times 10^{-10}$	
		0,25	$8,500 \times 10^{-11}$	
		0,30	$7,000 \times 10^{-11}$	
		0,35	$6,500 \times 10^{-11}$	
		0,40	$6,000 \times 10^{-11}$	
		0,45	$6,000 \times 10^{-11}$	
		0,50	$6,000 \times 10^{-11}$	
		0,55	$5,800 \times 10^{-11}$	
		0,60	$5,600 \times 10^{-11}$	
		0,65	$5,600 \times 10^{-11}$	

Material	Difusividade higríca, $D_w$ ( $m^2/s$ )		Fonte / autor:
Lã de vidro	-	U [ $kg/kg$ ]	$D_w$ [ $m^2/s$ ]
		0	$2,000 \times 10^{-08}$
		0,05	$1,000 \times 10^{-09}$
		0,10	$5,000 \times 10^{-10}$
		0,15	$3,500 \times 10^{-10}$
		0,20	$3,000 \times 10^{-10}$
		0,25	$2,800 \times 10^{-10}$
		0,30	$2,500 \times 10^{-10}$
		0,35	$2,400 \times 10^{-10}$
		0,40	$2,300 \times 10^{-10}$
		0,45	$2,200 \times 10^{-10}$
		0,50	$2,100 \times 10^{-10}$
		0,55	$2,050 \times 10^{-10}$
		0,60	$2,000 \times 10^{-10}$
		0,65	$2,000 \times 10^{-10}$
		0,70	$2,500 \times 10^{-10}$
		0,75	$3,000 \times 10^{-10}$
		0,80	$4,000 \times 10^{-10}$
		0,85	$6,000 \times 10^{-10}$
Barro vermelho	-	U [ $kg/kg$ ]	$D_w$ [ $m^2/s$ ]
		0,000	$2,50 \times 10^{-09}$
		0,005	$2,02 \times 10^{-09}$
		0,010	$1,54 \times 10^{-09}$
		0,020	$2,64 \times 10^{-09}$
		0,040	$6,53 \times 10^{-09}$
		0,070	$2,21 \times 10^{-08}$
		0,090	$5,61 \times 10^{-08}$
		0,110	$1,37 \times 10^{-07}$
		0,120	$1,78 \times 10^{-07}$
		0,130	$3,91 \times 10^{-07}$

R. Fauconnier, B. Florence, A. Laugier [3]

Curva pertencente à base de dados do TRHUMIDADE, valores obtidos por Vasco Freitas [1]

### 3.7. DIFUSIVIDADE HIGROTÉRMICA

A difusividade higrotérmica,  $D_T$ , traduz o efeito da termomigração na transferência global de humidade, sendo expressa em  $m^2/(s.K)$ . Trata-se de um parâmetro que intervém nas equações gerais que permitem a modelação do fenómeno de transferência de calor e humidade baseado no modelo de *Luikov e Philip – De Vries*. Atualmente este parâmetro não é muito utilizado em estudos na área de engenharia civil, mas são vários os investigadores que já procederam à sua determinação experimental, entre os quais: *Bernard Perrin* (1985) [19], *Fauconnier* (1979) [20], *Kooi* (1971) [21] e *Pierre Crausse* (1983) [22]. A importância deste parâmetro na transferência de humidade, depende da ordem de grandeza que  $D_w$  e  $D_T$  assumem num material. De facto, quando os valores de  $D_T$ , para um determinado elemento, são muito menores do que os valores de  $D_w$ , a temperatura terá apenas uma pequena influência nos fenómenos de transferência de humidade, a não ser que os gradientes de humidade sejam significativamente menores do que os gradientes de temperatura, o que é facilmente compreendido atendendo à equação (3). Por outro lado, nos materiais onde os valores de  $D_w$  e  $D_T$  são da mesma ordem de grandeza o fenómeno da termomigração passa a ter significado [1].

Apesar de não haver muita informação disponível capaz de descrever o procedimento experimental envolvido na obtenção de  $D_T$ , em [9] consegue-se perceber que o maior obstáculo ao seu cálculo não reside na complexidade do ensaio, que seguidamente se descreve, mas sim na informação à priori envolvida, como é o caso da curva de  $D_w$  em função do teor de humidade que ficou demonstrado em 3.6 ser bastante trabalhosa de obter.

De uma forma simplificada, a difusividade higrotérmica é determinada a partir da distribuição de humidade em estado estacionário. As amostras são embebidas em água até atingirem um determinado teor de humidade, sendo de seguida colocadas entre duas placas a diferentes temperaturas, uma a 40°C e outra a 12°C. As temperaturas das placas são mantidas constantes de modo a que o gradiente de temperatura no material seja o mais estável possível. As amostras, em forma de painéis, são isoladas nos contornos, de modo a obter uma distribuição unidimensional da temperatura. Decorridas algumas horas, os provetes são retirados do aparelho, e a distribuição de humidade é medida. Assegurando-se que a transferência de humidade apenas é possível na direção perpendicular às placas, então, num estado estacionário o equilíbrio é atingido segundo a equação:

$$M(kg/s) = 0 = -D_w \left( \frac{\partial U}{\partial x} \right) - D_t \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (23)$$

Através da equação (23), os valores de  $D_T$  podem ser determinados depois de conhecidos os gradientes de humidade, calculados através dos perfis de humidade no início e no final da experiência em diferentes zonas da amostra, e do gradiente de temperatura dado pelas temperaturas ajustadas no ensaio. O valor de  $D_w$ , para um determinado teor de humidade, terá de ser obtido pela curva de  $D_w(U)$  estabelecida à priori [9]. Para uma melhor interpretação dos resultados é frequente estabelecer-se um fator do gradiente de temperatura, que na bibliografia encontrada sobre esta temática assume sempre a simbologia -  $\varepsilon_T$  - expressa em  $K^{-1}$ :

$$\varepsilon_T = \frac{D_T}{D_w} = \frac{\partial U / \partial x}{\partial T / \partial x} \quad (24)$$

Assim, o mais frequente de encontrar na literatura é este fator  $\varepsilon_T$ , que permite obter as curvas da difusividade higrotérmica em função do teor de humidade, pela simples multiplicação pelos valores de  $D_w$ .

Na Tabela 8 apresenta-se uma compilação das curvas de  $D_T$  em função do teor de humidade, que foi possível recolher.

Tabela 8 – Valores de  $D_T$ , encontrados na literatura, para diferentes materiais porosos.

Material	Difusividade higrotérmica, $D_T$ ( $m^2/s.K$ )	Fonte / autor:
	U [ $kg/kg$ ]	$D_T$ [ $m^2/s.K$ ]
	0	0
	0,0022	$1,8772 \times 10^{-10}$
	0,0044	$5,3754 \times 10^{-10}$
	0,0066	$1,8120 \times 10^{-09}$
	0,0088	$4,4245 \times 10^{-09}$
	0,011	$9,2526 \times 10^{-09}$
	0,013	$4,3425 \times 10^{-08}$
Betão	0,0154	$1,2967 \times 10^{-07}$
-	0,0176	$2,1001 \times 10^{-07}$
	0,0198	$2,3006 \times 10^{-07}$
	0,022	$2,5124 \times 10^{-07}$
	0,0242	$2,6513 \times 10^{-07}$
	0,0264	$2,7985 \times 10^{-07}$
	0,0286	$2,7985 \times 10^{-07}$
	0,0308	$2,7992 \times 10^{-07}$
	0,033	$2,7997 \times 10^{-07}$

Material		Difusividade higrotérmica, $D_T$ (m <sup>2</sup> /s.K)		Fonte / autor:
Betão	Celular	U [kg/kg]	$D_T$ [m <sup>2</sup> /s.K]	Curva pertencente à base de dados do TRHUMIDADE, valores obtidos por Kool [1]
		0,011	$2,01 \times 10^{-13}$	
		0,016	$2,46 \times 10^{-13}$	
		0,031	$2,91 \times 10^{-12}$	
		0,062	$8,36 \times 10^{-12}$	
		0,158	$2,14 \times 10^{-11}$	
		0,272	$3,18 \times 10^{-11}$	
		0,388	$3,81 \times 10^{-11}$	
		0,472	$3,75 \times 10^{-11}$	
		0,500	$3,28 \times 10^{-11}$	
		0,511	$1,95 \times 10^{-11}$	
		0,520	$1,56 \times 10^{-12}$	
Gesso	-	U [kg/kg]	$D_T$ [m <sup>2</sup> /s.K]	R.Fauconnier [3]
		0	0	
		0,02	$2,502 \times 10^{-11}$	
		0,04	$2,1252 \times 10^{-10}$	
		0,06	$2,7163 \times 10^{-10}$	
		0,08	$4,4480 \times 10^{-10}$	
		0,1	$2,2020 \times 10^{-10}$	
		0,12	$1,1100 \times 10^{-10}$	
		0,14	$1,1484 \times 10^{-10}$	
		0,16	$1,3608 \times 10^{-10}$	
		0,18	$1,6224 \times 10^{-10}$	
		0,2	$2,0167 \times 10^{-10}$	
		0,22	$2,8322 \times 10^{-10}$	
		0,24	$3,5306 \times 10^{-10}$	
		0,26	$4,5296 \times 10^{-10}$	
		0,28	$5,5792 \times 10^{-10}$	
		0,30	$7,2159 \times 10^{-10}$	
		0,32	$1,8968 \times 10^{-09}$	
		0,34	$4,8600 \times 10^{-09}$	
		0,36	$5,5723 \times 10^{-09}$	
Madeira	Fibra (painéis)	U [kg/kg]	$D_T$ [m <sup>2</sup> /s.K]	R.Fauconnier [3]
		0	-	
		0,01	$2,807 \times 10^{-05}$	
		0,02	$1,515 \times 10^{-05}$	
		0,03	$1,154 \times 10^{-05}$	
		0,04	$1,155 \times 10^{-05}$	
		0,05	$2,166 \times 10^{-05}$	
		0,06	$3,463 \times 10^{-05}$	
		0,07	$4,957 \times 10^{-05}$	
		0,08	$6,346 \times 10^{-05}$	
		0,09	$7,792 \times 10^{-05}$	
		0,10	$8,791 \times 10^{-05}$	
		0,11	$9,379 \times 10^{-05}$	
		0,12	$9,964 \times 10^{-05}$	
		0,13	$1,010 \times 10^{-04}$	
		0,14	$9,306 \times 10^{-05}$	
		0,15	$7,142 \times 10^{-05}$	

Material		Difusividade higrotérmica, $D_T$ ( $m^2/s.K$ )		Fonte / autor:
Poliestireno	Expandido	U [ $kg/kg$ ]	$D_T$ [ $m^2/s.K$ ]	R.Fauconnier [3]
		0,8	$7,000 \times 10^{-10}$	
		0,9	$2,575 \times 10^{-08}$	
		1,0	$1,236 \times 10^{-07}$	
		1,1	$3,863 \times 10^{-07}$	
		1,2	$4,120 \times 10^{-07}$	
		1,3	$2,575 \times 10^{-07}$	
		1,4	$1,545 \times 10^{-07}$	
		1,5	$1,082 \times 10^{-07}$	
Poliuretano	-	U [ $kg/kg$ ]	$D_T$ [ $m^2/s.K$ ]	R.Fauconnier [3]
		0	-	
		0,05	$1,0000 \times 10^{-09}$	
		0,10	$1,2500 \times 10^{-09}$	
		0,15	$1,1200 \times 10^{-09}$	
		0,20	$8,8000 \times 10^{-10}$	
		0,25	$7,6500 \times 10^{-10}$	
		0,30	$7,0000 \times 10^{-10}$	
		0,35	$7,8000 \times 10^{-10}$	
		0,40	$7,8000 \times 10^{-10}$	
		0,45	$8,4000 \times 10^{-10}$	
		0,50	$9,0000 \times 10^{-10}$	
		0,55	$9,2800 \times 10^{-10}$	
		0,60	$8,9600 \times 10^{-10}$	
		0,65	$8,9600 \times 10^{-10}$	
Lã de vidro	-	U [ $kg/kg$ ]	$D_T$ [ $m^2/s.K$ ]	R. Fauconnier, B. Florence, A. Laugier [3]
		0,30	$2,5000 \times 10^{-11}$	
		0,35	$2,4000 \times 10^{-10}$	
		0,40	$1,1500 \times 10^{-09}$	
		0,45	$2,2000 \times 10^{-09}$	
		0,50	$3,1500 \times 10^{-09}$	
		0,55	$3,4850 \times 10^{-09}$	
		0,60	$3,6000 \times 10^{-09}$	
		0,65	$3,6000 \times 10^{-09}$	
		0,70	$4,7500 \times 10^{-09}$	
		0,75	$5,7000 \times 10^{-09}$	
		0,80	$8,0000 \times 10^{-09}$	
		0,85	$1,2000 \times 10^{-08}$	
Barro vermelho	-	U [ $kg/kg$ ]	$D_T$ [ $m^2/s.K$ ]	Curva pertencente à base de dados do TRHUMIDADE, valores obtidos por Perrin[1]
		0,000	$4,95 \times 10^{-12}$	
		0,005	$6,30 \times 10^{-12}$	
		0,010	$1,03 \times 10^{-11}$	
		0,020	$1,53 \times 10^{-11}$	
		0,040	$1,88 \times 10^{-11}$	
		0,070	$1,77 \times 10^{-11}$	
		0,090	$1,56 \times 10^{-11}$	
		0,110	$1,08 \times 10^{-11}$	
		0,120	$7,85 \times 10^{-12}$	
		0,130	$4,95 \times 10^{-12}$	

### 3.8. CONDUTIBILIDADE TÉRMICA

A condutibilidade térmica representa o fluxo de calor em Watts, que atravessa perpendicularmente um elemento de  $1\text{m}^2$  de secção com 1m de espessura, quando a diferença de temperatura entre as suas faces, planas e paralelas, é de  $1^\circ\text{C}$ . Designa-se pelo símbolo  $\lambda$  e expressa-se em  $\text{W}/(\text{mK})$ .

São vários os métodos previstos para a determinação da condutibilidade térmica dos materiais de construção, que segundo *Jiri Zach e Stanislav Stastnik* em [23], se podem organizar em dois grandes grupos: métodos estacionários e não estacionários, integrando cada um deles várias técnicas, sendo as mais comuns em cada grupo o método do “Guarded-hot-plate” e do choque térmico, respetivamente. De seguida efetua-se uma breve descrição de cada um dos métodos, apontando as principais vantagens e inconvenientes:

- **Método GPH – “Guarded-hot-plate”:** O sistema de medição consiste na utilização de uma unidade de aquecimento protegida, duas placas auxiliares de aquecimento, duas unidades de refrigeração, e uma proteção secundária constituída por um material isolante [11]. Dois provetes iguais de faces lisas e em forma de placa quadrada com dimensões especificadas, são expostos a diferentes temperaturas nas suas faces opostas, conseguidas por placas de aquecimento e arrefecimento. Lateralmente é ainda colocado um material isolante para evitar o fluxo de calor lateral. Decorrido o tempo necessário para a estabilização de todo o sistema, é possível obter um fluxo constante e unidirecional perpendicular às faces do provete. A determinação da condutibilidade térmica é assim conseguida através do conhecimento da potência elétrica fornecida ao aquecedor principal, das temperaturas nas faces dos provetes, bem como das dimensões dos mesmos[12]. O equipamento envolvido neste método encontra-se representado na Figura 19.



Figura 19 – Equipamento envolvido no método “Guarded-hot-plate” (LFC – FEUP) [8].

Este método, apesar de ser bastante preciso é também muito moroso, o que faz com que só possa ser aplicado a materiais secos, sem possibilidade de determinar a condutibilidade térmica em função do teor de humidade. De facto, este é um problema comum à maioria das técnicas laboratoriais utilizadas neste âmbito. O longo período de exposição, ao efeito do fluxo de calor, a que as amostras são submetidas é responsável por migrações e reposicionamentos da humidade na estrutura dos materiais, mesmo nos casos em que os provetes são envolvidos por uma película resistente ao vapor. Assim, os valores finais medidos podem estar falseados, não sendo representativos das reais condições dos materiais sob um determinado teor de humidade [23].

- **Método do choque térmico:** O aparelho utilizado neste método – CT Mètre – é constituído por uma unidade de controlo, que gera a potência de calor e analisa a temperatura induzida no interior do material ensaiado, e por uma sonda responsável por transmitir o fluxo de calor e medir



a temperatura originada no provete. A sonda é colocada entre duas amostras de idênticas características a ensaiar, sendo a temperatura registada dependente da condutibilidade do material testado. Na Figura 20 é visível o equipamento CT Mètre para a obtenção da condutibilidade térmica [11].



Figura 20 – Equipamento envolvido no método do choque térmico (LFC-FEUP).

Uma vantagem deste método em relação ao anterior é a rapidez das medições, com durações de apenas alguns segundos. Esta característica torna viável obter o valor da condutibilidade térmica em função do teor de humidade da amostra testada. Outra mais valia do método é a flexibilidade conseguida nas medições. De facto, o sensor plano permite determinar  $\lambda$  em materiais não homogêneos, não havendo exigências tão rigorosas de preparação das amostras como o método “Guarded-hot-plate” exige [23].

Na Tabela 9 apresentam-se algumas normas com a descrição dos ensaios para a determinação da condutibilidade térmica por vários métodos.

Tabela 9 – Normas de ensaio relativas à determinação da condutibilidade térmica.

Norma	Descrição	Domínio de Aplicação
NP 116:1962	Determinação da condutibilidade térmica pelo processo da placa quente	Materiais de construção
ISO 8301:1991	Determinação da condutibilidade térmica pelo método do choque térmico	Materiais de construção
ISO 8302:1991	Determinação da condutibilidade térmica pelo método do Guard-hot-plate	Materiais de construção

O programa TRHUMIDADE permite contabilizar a influência da temperatura e do teor de humidade na condutibilidade térmica dos materiais de construção. Contudo, os valores encontrados na literatura para esta propriedade estão frequentemente associados ao elemento no estado seco, ou a um teor de humidade de referência compatível com as aplicações correntes nos edifícios. Assim, um utilizador que não disponha dessa informação, pode sempre desprezar a sensibilidade do  $\lambda$  à temperatura e ao teor de humidade, o que pode ou não ter uma influência significativa dependendo do elemento em análise. Nas simulações efetuadas com o barro vermelho e com o betão celular, essa variação foi considerada, apesar das curvas que descrevem a evolução do  $\lambda$  com o teor de humidade e com a temperatura não terem sido

determinadas experimentalmente por *Vasco Freitas*, que na altura adotou os valores que *Perrin* [19] e *Quenard* [24], respetivamente, obtiveram para estes elementos. Uma outra razão que pode justificar desprezar a medição dos valores de  $\lambda$  em função do teor de humidade, ocorre quando se pretende estudar situações em regime isotérmico. Atendendo às razões apontadas anteriormente, parece conveniente fazer a compilação possível dos valores da condutibilidade térmica encontrados na literatura, ainda que na maioria das situações  $\lambda$  não seja apresentado como uma função de U e T, isto é,  $\lambda(U, T)$ , como se encontra na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores de  $\lambda$ , encontrados na literatura, para diferentes materiais porosos.

Material	Condutibilidade térmica, $\lambda$ (W/m.K)				Fonte / autor:	
Betão	Densidade média	[1,15-1,65]			EN 12524 [7]	
	Alta densidade	2,0				
		U [kg/kg]	$\lambda$ [W/m.K]		K. Kiessl, K.Gertis [3]	
		0	1,42			
		0,01	2,343			
	-	0,02	2,769			
		0,03	3,053			
		0,04	3,195			
		0,05	3,266			
		0,06	3,408			
		U [kg/kg]	$\lambda$ , 10°C	$\lambda$ , 30°C	$\lambda$ , 50°C	Curva pertencente à base de dados do TRHUMIDADE, valores obtidos por Quenard [1]
		0,011	0,140	0,141	0,144	
		0,016	0,142	0,144	0,148	
		0,031	0,149	0,153	0,161	
		0,062	0,163	0,171	0,187	
	Celular	0,158	0,211	0,241	0,277	
		0,272	0,278	0,345	0,430	
		0,388	0,313	0,400	0,565	
		0,472	0,337	0,414	0,611	
		0,500	0,345	0,419	0,618	
		0,511	0,348	0,421	0,620	
		0,520	0,351	0,422	0,617	
Gesso	Projetado	[0,18-0,56]			EN 12524 [7]	
	Em painel	0,25				
		U [kg/kg]	$\lambda$ , 20°C	$\lambda$ , 40°C	$\lambda$ , 60°C	Daligand Murat [3]
		0	0,3580	0,3860	0,4140	
		0,008	0,4475	0,4825	0,5175	
	-	0,0402	0,5012	0,5404	0,5796	
		0,0803	0,5979	0,6446	0,6914	
		0,1600	0,6981	0,7527	0,8073	
		0,2410	0,7804	0,8415	0,9025	
		0,3200	0,8520	0,9187	0,9853	
Pedra calcária	Extra macia	0,85			EN 12524 [7]	
	Macia	1,1				
	Semi-dura	1,4				
	Dura	1,7				
	Extra dura	2,3				
	-	1,33			Isabel Torres [8]	

Material	Condutibilidade térmica, $\lambda$ (W/m.K)					Fonte / autor:
Madeira	Contraplacado (painéis)		[0,09 -0,24]			EN 12524 [7]
	Fibra (painéis)	U [kg/kg]	$\lambda$ , 10°C	$\lambda$ , 20°C	$\lambda$ , 40°C	S.Hokoi, G. Horie, T. Ikeda [3]
		0	0,0613	0,0630	0,0664	
		0,25	0,0797	0,0819	0,0863	
		0,50	0,0981	0,1008	0,1062	
		0,75	0,1165	0,1197	0,1262	
		1,00	0,1349	0,1386	0,1461	
		1,25	0,1533	0,1575	0,1660	
		1,50	0,1716	0,1764	0,1859	
		1,75	0,1900	0,1953	0,2058	
		2,00	0,2084	0,2142	0,2258	
Poliestireno	Expandido	U [kg/kg]	$\lambda$ , 10°C	$\lambda$ , 30°C	$\lambda$ , 60°C	J.C.Marechal
		0	0,0375	0,0398	0,0432	
		2	0,0398	0,0422	0,0458	
		4	0,0410	0,0435	0,0472	
		6	0,0420	0,0446	0,0484	
Poliuretano	-	U [kg/kg]	$\lambda$ , 10°C	$\lambda$ , 40°C	$\lambda$ , 70°C	J.C. Marechal [3]
		0	0,0248	0,0256	0,0277	
		5	0,0260	0,0268	0,0290	
		10	0,0270	0,0279	0,0302	
		15	0,0279	0,0287	0,0311	
Lã de vidro	-	U [kg/kg]	$\lambda$ , 10°C	$\lambda$ , 30°C	$\lambda$ , 40°C	J.C. Marechal [3]
		0	0,0315	0,0335	0,0345	
		2,875	0,0317	0,0337	0,0348	
		5,714	0,0340	0,0361	0,0372	
		8,571	0,0375	0,0398	0,0410	
		11,428	0,0412	0,0439	0,0452	
Argamassa	-	0,37			Isabel Torres [8]	
Barro vermelho	-	U [kg/kg]	$\lambda$ , 10°C	$\lambda$ , 30°C	$\lambda$ , 50°C	Curva pertencente à base de dados do TRHUMIDADE, valores obtidos por Perrin [1]
		0,000	1,00	1,00	1,00	
		0,005	1,05	1,05	1,05	
		0,010	1,09	1,10	1,10	
		0,020	1,18	1,19	1,20	
		0,040	1,36	1,38	1,39	
		0,070	1,55	1,58	1,60	
		0,090	1,69	1,72	1,73	
		0,110	1,84	1,86	1,87	
		0,120	1,92	1,93	1,93	
		0,130	2,00	2,00	2,05	

### 3.9. SUCÇÃO CAPILAR

A sucção capilar define-se como sendo a diferença entre a pressão do ar e a pressão da água nos poros do material, simbolicamente representada por  $S$ , em Pa [25]. A humificação dos materiais de construção por capilaridade, conduz à formação de interfaces curvas entre o fluído (água) e o ar contido no interior dos poros, onde se estabelecem gradientes de pressões, como é visível na Figura 21. A sucção capilar varia com a temperatura e com o teor de humidade, sendo tanto menor quanto maior for o teor de humidade, anulando-se para um teor de humidade igual ao teor de humidade máximo [1].



Figura 21 – Fenômeno da capilaridade [1]

A determinação das curvas de sucção capilar pode ser obtida por diversos métodos que foram revistos por *Fagerlund* em [26]. Desses métodos, destacam-se os seguintes, apesar de maioritariamente se ter optado por não traduzir as suas designações: *suction plate apparatus* – “prato de pressão”, *pressure plates membrane*, *centrifuge*, *rate of penetration of wetting liquids* e *displacement*. Além disso, é ainda possível obter uma parte da curva de sucção capilar a partir da curva higroscópica e de outras técnicas enunciadas em [27]. Dos processos apresentados o mais comum é o designado por “prato de pressão”, já anteriormente mencionado neste trabalho a propósito da obtenção das curvas de adsorção/desadsorção para humidades relativas muito elevadas. O dispositivo utilizado nesta técnica é visível na Figura 22, apresentando placas de cerâmica removíveis, onde a amostra a testar é colocada. O lado do prato cerâmico onde o provete é pousado é exposto a uma sobrepressão que pode ser ajustada, enquanto o outro lado do prato estará sempre submetido à pressão atmosférica. Esta disposição resulta numa diferença de pressão provocada sobre a amostra. Um método padrão para a utilização desta técnica existe desde 1997, e pode ser visto no Nordtest StandardNTBUILD 481 [28]. De uma forma simplificada, o procedimento consiste na imersão das amostras até a saturação capilar ser atingida. Estando as amostras saturadas, estas são de seguida colocadas na placa cerâmica, onde a aplicação de diferentes níveis de sobrepressão força a saída de água em excesso dos provetes através dos tubos de saída (lado esquerdo da Figura 22). Quando o equilíbrio é atingido, deixando a água de “pingar” dos tubos, as amostras são pesadas, de modo a determinar a perda de água. Este procedimento será repetido até a pressão máxima ser atingida [25]. A obtenção da sucção capilar,  $S$ , pode ser conseguida diretamente quando se utiliza os chamados *pressure plate extractors*, ou de forma indireta recorrendo à equação de Laplace combinada com a equação de *Kelvin*, conforme se encontra em [25].

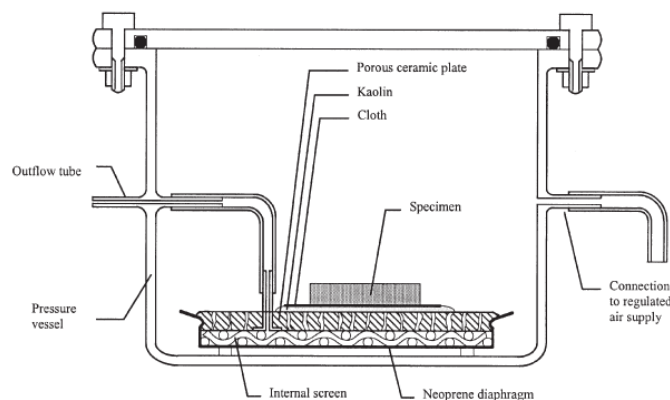


Figura 22 – Esquema do método do “prato de pressão” [25].

No programa TRHUMIDADE, as curvas de sucção capilar adotadas para o barro vermelho e para o betão celular não foram determinadas experimentalmente por *Vasco Freitas*, atendendo à grande dificuldade experimental envolvida, principalmente para valores superiores ao domínio higroscópico. Nesse

sentido, o autor adotou uma curva média entre as disponíveis na bibliografia para caracterizar cada um dos elementos, e que estão também inseridas na Tabela 11, entre outras recolhidas da literatura. À semelhança do considerado para as curvas de adsorção/desadsorção, também as curvas de sucção inseridas no TRHUMIDADE serão constituídas por tramos de variação linear, por facilidade de modelização.

Tabela 11 – Valores de S, encontrados na literatura, para diferentes materiais porosos.

Material		Sucção capilar, S (Pa)		Fonte / autor:
Betão	-	U [kg/kg]	S [Pa]	J.C.Marechal [3]
		0	$9,806 \times 10^8$	
		0,007	$3,9028 \times 10^8$	
		0,014	$2,2946 \times 10^8$	
		0,021	$1,7062 \times 10^8$	
		0,028	$1,3532 \times 10^8$	
		0,035	$1,0983 \times 10^8$	
		0,042	$8,9431 \times 10^7$	
		0,049	$6,6289 \times 10^7$	
		0,056	$4,5892 \times 10^7$	
		0,063	$2,5201 \times 10^7$	
		0,0665	$1,2356 \times 10^7$	
		U [kg/kg]	S [Pa]	Curva pertencente à base de dados do TRHUMIDADE, resultante de uma média entre os valores de obtidos por Kool e Bomberg [1]
		0,011	$7,87 \times 10^8$	
		0,016	$6,90 \times 10^8$	
		0,031	$4,00 \times 10^8$	
		0,062	$1,81 \times 10^7$	
		0,158	$8,40 \times 10^5$	
		0,272	$2,30 \times 10^5$	
		0,388	$8,65 \times 10^4$	
		0,472	$2,42 \times 10^4$	
		0,500	$1,04 \times 10^4$	
Gesso	-	U [kg/kg]	S [Pa]	J.C.Marechal [3]
		0	$9,806 \times 10^8$	
		0,0039	$3,9224 \times 10^5$	
		0,0078	$2,1573 \times 10^5$	
		0,0195	$1,0296 \times 10^5$	
		0,0390	$9,9040 \times 10^4$	
		0,0585	$8,8254 \times 10^4$	
		0,0780	$6,8642 \times 10^4$	
		0,0975	$5,8836 \times 10^4$	
		0,1170	$4,9030 \times 10^4$	
		0,1560	$3,9224 \times 10^4$	
		0,1950	$3,6282 \times 10^4$	
		0,2340	$3,1379 \times 10^4$	
		0,3315	$3,0398 \times 10^4$	
		0,3744	$2,8437 \times 10^4$	
		0,3822	$2,1573 \times 10^4$	
		0,3900	$9,8060 \times 10^1$	

Material		Sucção capilar, $S$ (Pa)		Fonte / autor:
Madeira	Fibra (painéis)	U [kg/kg]	S [Pa]	J.C.Marechal [3]
		0	$9,806 \times 10^8$	
		0,135	$5,1285 \times 10^7$	
		0,270	$1,5346 \times 10^6$	
		0,405	$1,8690 \times 10^5$	
		0,540	$5,2854 \times 10^4$	
		0,675	$3,0104 \times 10^4$	
		0,810	$1,9808 \times 10^4$	
		0,945	$1,2943 \times 10^4$	
		1,080	$6,9622 \times 10^3$	
		1,215	$2,0593 \times 10^3$	
		1,350	$9,8060 \times 10^1$	
Poliestireno	Expandido	U [kg/kg]	S [Pa]	J.C. Marechal [3]
		0	$9,8060 \times 10^8$	
		0,0961	$1,9612 \times 10^8$	
		0,2883	$9,806 \times 10^7$	
		0,3844	$1,9612 \times 10^7$	
		0,4805	$1,9612 \times 10^6$	
		0,6727	$3,9224 \times 10^5$	
		0,7688	$9,806 \times 10^4$	
		0,9610	$1,9612 \times 10^4$	
		1,2493	$3,9224 \times 10^3$	
		1,4415	$1,1767 \times 10^3$	
		1,9220	$5,3933 \times 10^2$	
		4,8050	$1,5689 \times 10^2$	
		7,2075	$1,0787 \times 10^2$	
		8,1685	$9,806 \times 10^1$	
		9,6100	$9,806 \times 10^0$	
Poliuretano	-	U [kg/kg]	S [Pa]	J.C. Marechal [3]
		0	$9,806 \times 10^8$	
		3,010	$4,903 \times 10^3$	
		4,515	$3,922 \times 10^3$	
		6,020	$3,432 \times 10^3$	
		9,030	$2,941 \times 10^3$	
		12,04	$2,696 \times 10^3$	
		15,05	$2,402 \times 10^3$	
		18,06	$2,108 \times 10^3$	
		21,07	$1,863 \times 10^3$	
		24,08	$1,568 \times 10^3$	
		27,09	$1,029 \times 10^3$	
		28,595	$5,884 \times 10^2$	
		30,100	$9,806 \times 10^1$	
Lã de vidro	-	U [kg/kg]	S [Pa]	Crausse [3]
		0	$9,8060 \times 10^8$	
		0,0594	$6,2758 \times 10^2$	
		0,0810	$4,0695 \times 10^2$	
		0,4995	$3,1379 \times 10^2$	
		5,2515	$2,6476 \times 10^2$	
		12,744	$1,5690 \times 10^2$	
		13,298	$4,9030 \times 10^1$	
		13,5	$9,8060 \times 10^0$	

Material		Sucção capilar, $S$ (Pa)		Fonte / autor:
		$U$ [kg/kg]	$S$ [Pa]	
Barro vermelho	-	0,000	$8,00 \times 10^8$	Curva pertencente à base de dados do TRHUMIDADE, resultante de uma média entre os valores obtidos por Bomberg e Crausse [1]
		0,005	$4,42 \times 10^8$	
		0,010	$8,35 \times 10^7$	
		0,020	$1,34 \times 10^6$	
		0,040	$7,14 \times 10^5$	
		0,070	$2,02 \times 10^5$	
		0,090	$1,26 \times 10^5$	
		0,110	$5,05 \times 10^4$	
		0,120	$1,26 \times 10^4$	
		0,130	$2,87 \times 10^3$	

### 3.10. CONSTRUÇÃO DE UMA BASE DE DADOS PARA O PROGRAMA TRHUMIDADE

Neste momento, o TRHUMIDADE apenas apresenta dois materiais na sua base de dados: o barro vermelho e o betão celular. Após a pesquisa e recolha dos valores disponíveis na literatura das oito propriedades necessárias à execução do programa, elaborada nos subcapítulos anteriores, tornou-se possível seleccionar os materiais para os quais se dispõe de informação para todos esses parâmetros. Dessa selecção, resultou a criação de 6 fichas que reúnem os dados necessários à execução do programa, constituindo um contributo para aumentar e melhorar a base de dados do TRHUMIDADE. Os 6 materiais em questão são:

- Betão;
- Gesso;
- Painéis de fibra de madeira;
- Poliuretano;
- Poliestireno expandido;
- Lã de vidro.

Apesar do contributo que estes dados possam desempenhar em trabalhos futuros, é importante salvasguardar que a informação compilada nas 6 fichas ainda terá de ser trabalhada para que possa ser introduzida directamente no programa. De facto, é importante não esquecer que no TRHUMIDADE as propriedades dependentes do teor de humidade:  $D_w$ ,  $D_T$ ,  $S$  e  $\lambda$ , são definidas em função de teores de humidade inseridos no vetor VLIN. Os teores de humidade contidos neste vetor podem ser quaisquer, mas têm de caracterizar o material em todos os domínios, isto é, devem incluir valores desde 0 kg/kg, até ao teor de humidade de saturação, ou mesmo até ao teor de humidade máximo nos estudos específicos em que tal se justifique. Assim,  $D_w$ ,  $D_T$ ,  $S$  e  $\lambda$ , terão de ser introduzidos no programa para os mesmos teores de humidade definidos no vetor VLIN, característico de cada material. Para exemplificar o que acaba de ser dito na Figura 23 encontra-se representado o vetor VLIN do barro vermelho, utilizado nas simulações efetuadas neste trabalho. Deste modo, será portanto necessário fazer um esforço de homogeneizar as propriedades para os mesmos teores de humidade, criando um vetor VLIN para os novos materiais.

0.000	0.005	0.010	0.020	0.040
0.070	0.090	0.110	0.120	0.130

$U_{sat}$

Figura 23 – Vetor VLIN do barro vermelho, com os teores de humidade a partir dos quais são definidos  $D_w$ ,  $D_T$ ,  $S$  e  $\lambda$ .

Um dos problemas envolvidos nesse trabalho prende-se com o facto de que, na grande maioria das vezes, o maior valor disponível do teor de humidade em função do qual os parâmetros são definidos é muito menor do que o teor de humidade de saturação, como se pode verificar nas fichas apresentadas. Este aspeto constitui um entrave à criação do vetor VLIN. No sentido de identificar os materiais e as propriedades onde tal problema é mais relevante elaborou-se a Tabela 12, em que os casos a vermelho apontam para a necessidade de mais resultados experimentais por forma a completar as propriedades para teores de humidade mais elevados, os casos a amarelo indicam proximidade entre as propriedade conhecidas e as pretendidas, e por fim os casos a verde são representativos de situações adequadas para a elaboração de VLIN.

Tabela 12 – Identificação dos materiais onde há uma maior diferença entre o teor de humidade de saturação e o teor de humidade mais elevado, para a elaboração de VLIN.

	Betão	Gesso	P.F. Madeira	Poliuretano	Poliestireno expandido	Lã de vidro
	$U_{sat}=0,07$	$U_{sat}=0,39$	$U_{sat}=1,35$	$U_{sat}=30,1$	$U_{sat}=9,61$	$U_{sat}=13,5$
$D_W$	$U_{m.v.d}=0,033$	$U_{m.v.d}=0,36$	$U_{m.v.d}=0,16$	$U_{m.v.d}=0,65$	$U_{m.v.d}=1,5$	$U_{m.v.d}=0,85$
$D_T$	$U_{m.v.d}=0,033$	$U_{m.v.d}=0,36$	$U_{m.v.d}=0,15$	$U_{m.v.d}=0,65$	$U_{m.v.d}=1,5$	$U_{m.v.d}=0,85$
S	$U_{m.v.d}=0,0665$	$U_{m.v.d}=0,39$	$U_{m.v.d}=1,35$	$U_{m.v.d}=30,1$	$U_{m.v.d}=9,61$	$U_{m.v.d}=13,5$
$\lambda$	$U_{m.v.d}=0,06$	$U_{m.v.d}=0,32$	$U_{m.v.d}=2,00$	$U_{m.v.d}=15,0$	$U_{m.v.d}=6,0$	$U_{m.v.d}=14,29$

Em que,

$U_{sat}$	– Teor de humidade de saturação	[kg/kg]
$U_{m.v.d}$	– Maior valor disponível do teor de humidade	[kg/kg]

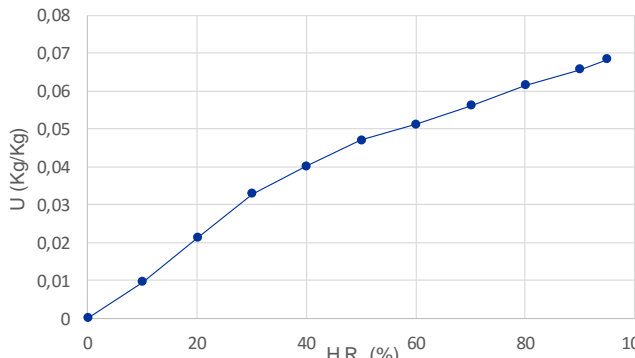
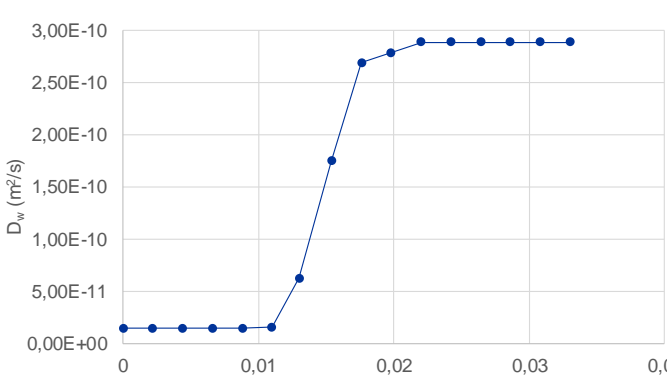
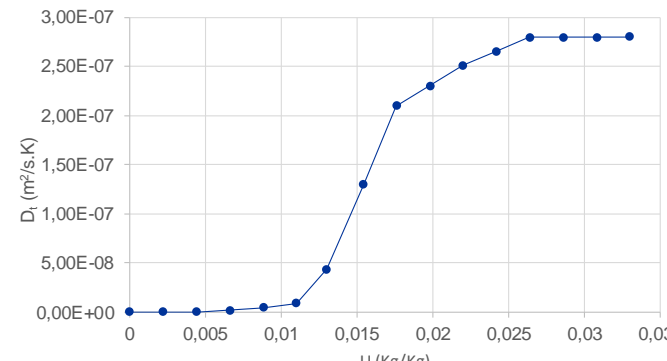
O facto de não se conhecer, para alguns materiais, o desenvolvimento das curvas de cada parâmetro para teores de humidade próximos ou superiores ao de saturação, pode não constituir um entrave tão significativo à execução do programa. De facto, a representação gráfica das curvas  $D_W$  (U) e  $D_T$  (U), parâmetros que evidenciam maiores lacunas de informação (Tabela 12), revela para certos materiais, um comportamento assintótico, que pode não justificar a determinação experimental dessas propriedades para teores de humidade mais elevados. É o caso do betão e do poliuretano, onde a partir de um determinado teor de humidade os valores de  $D_W$  e  $D_T$  parecem estabilizar, como é visível nos gráficos presentes nas fichas de cada um dos materiais, Tabela 13 e Tabela 16, respetivamente. Assim, um futuro utilizador poderá construir o vetor VLIN do betão e do poliuretano, mantendo constantes  $D_W$  e  $D_T$  até ao respetivo teor de humidade de saturação, sem que provavelmente esteja a introduzir erros significativos no real comportamento do material.

Um último ponto a esclarecer, prende-se com o facto de não se ter encontrado informação suficiente para caracterizar a dependência das propriedades não só com o teor de humidade, mas também com a temperatura. O TRHUMIDADE apresenta essa possibilidade, mas na contribuição dada para a construção da base de dados do programa, apenas para a condutibilidade térmica se conseguiu contabilizar a influência da temperatura.

Nas Tabela 13, Tabela 14, Tabela 15, Tabela 16, Tabela 17 e Tabela 18 apresentam-se as 6 fichas com as propriedades necessárias como dados de entrada do programa TRHUMIDADE, para o betão, gesso, painéis de fibra de madeira, poliuretano, poliestireno expandido e lã de vidro.



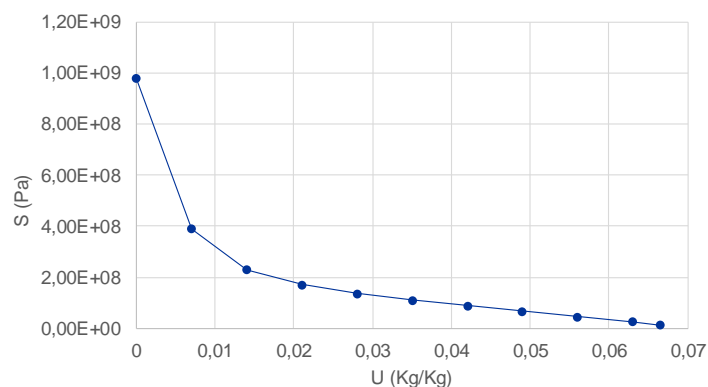
Tabela 13 – Ficha com as propriedades necessárias ao TRHUMIDADE para o betão.

Nome do material: Betão		
Massa volúmica seca: $\rho_0 \in [2250, 2270] \text{ kg/m}^3$	Calor específico: $C_0=940\text{J}/(\text{kg.K})$	
Porosidade: $\xi = 0,153 \text{ m}^3/\text{m}^3$	$U_{sat}=0,07 \text{ kg/kg}$	
Curva higroscópica:		
HR[–]	$U [\text{kg/kg}]$	
0	0	
10	0,0096	
20	0,0212	
30	0,0328	
40	0,0401	
50	0,0470	
60	0,0512	
70	0,0561	
80	0,0616	
90	0,0658	
95	0,0684	
Difusividade higríca: $D_w [\text{m}^2/\text{s}]$		
$U [\text{kg/kg}]$	$D_w [\text{m}^2/\text{s}]$	
0	$1,444 \times 10^{-11}$	
0,0022	$1,444 \times 10^{-11}$	
0,0044	$1,445 \times 10^{-11}$	
0,0066	$1,445 \times 10^{-11}$	
0,0088	$1,454 \times 10^{-11}$	
0,011	$1,564 \times 10^{-11}$	
0,013	$6,259 \times 10^{-11}$	
0,0154	$17,48 \times 10^{-11}$	
0,0176	$26,91 \times 10^{-11}$	
0,0198	$27,89 \times 10^{-11}$	
0,022	$28,868 \times 10^{-11}$	
0,0242	$28,872 \times 10^{-11}$	
0,0264	$28,877 \times 10^{-11}$	
0,0286	$28,880 \times 10^{-11}$	
0,0308	$28,885 \times 10^{-11}$	
0,033	$28,890 \times 10^{-11}$	
Difusividade higrotérmica: $D_T [\text{m}^2/\text{s.K}]$		
$U [\text{kg/kg}]$	$D_T [\text{m}^2/\text{s.K}]$	
0	0	
0,0022	$1,8772 \times 10^{-10}$	
0,0044	$5,3754 \times 10^{-10}$	
0,0066	$1,8120 \times 10^{-09}$	
0,0088	$4,4245 \times 10^{-09}$	
0,011	$9,2526 \times 10^{-09}$	
0,013	$4,3425 \times 10^{-08}$	
0,0154	$1,2967 \times 10^{-07}$	
0,0176	$2,1001 \times 10^{-07}$	
0,0198	$2,3006 \times 10^{-07}$	
0,022	$2,5124 \times 10^{-07}$	
0,0242	$2,6513 \times 10^{-07}$	
0,0264	$2,7985 \times 10^{-07}$	
0,0286	$2,7985 \times 10^{-07}$	
0,0308	$2,7992 \times 10^{-07}$	
0,033	$2,7997 \times 10^{-07}$	

Nome do material: Betão

U [kg/kg]	S [Pa]
0	$9,806 \times 10^8$
0,007	$3,9028 \times 10^8$
0,014	$2,2946 \times 10^8$
0,021	$1,7062 \times 10^8$
0,028	$1,3532 \times 10^8$
0,035	$1,0983 \times 10^8$
0,042	$8,9431 \times 10^7$
0,049	$6,6289 \times 10^7$
0,056	$4,5892 \times 10^7$
0,063	$2,5201 \times 10^7$
0,0665	$1,2356 \times 10^7$

Sucção capilar: S [Pa]



U [kg/kg]	$\lambda$ [W/m.K]
0	1,42
0,01	2,343
0,02	2,769
0,03	3,053
0,04	3,195
0,05	3,266
0,06	3,408

Condutibilidade térmica:  $\lambda$  [W/m.K]

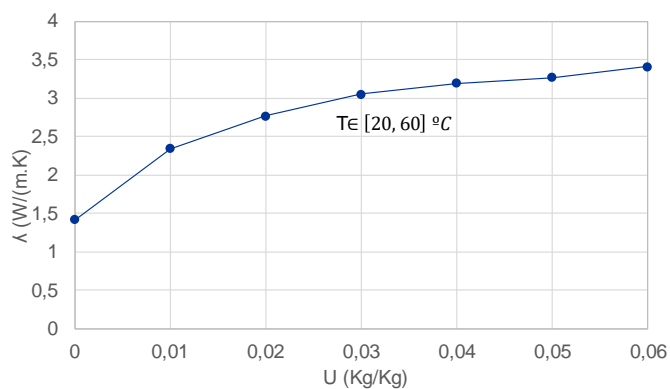
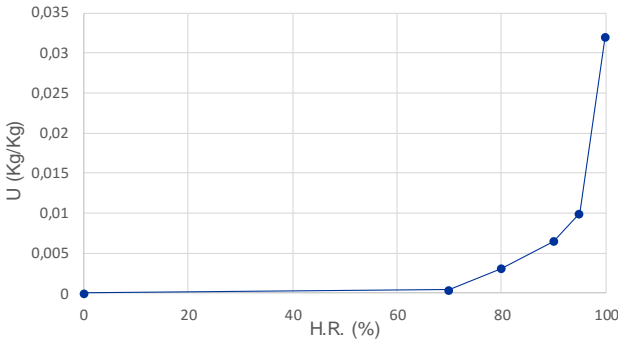
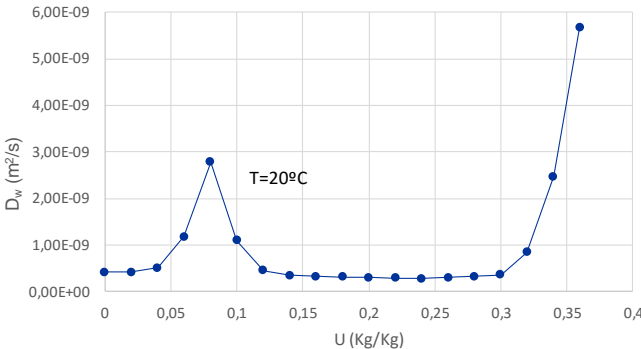
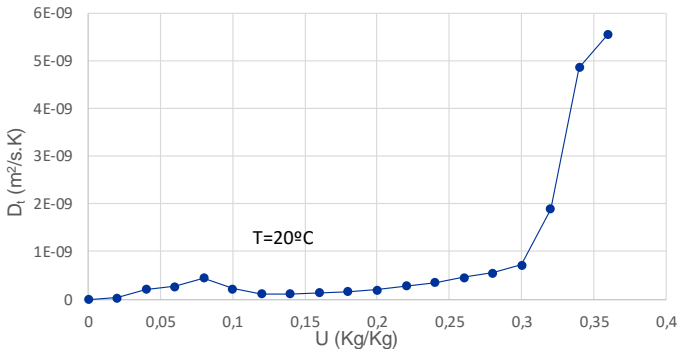


Tabela 14 – Ficha com as propriedades necessárias ao TRHUMIDADE para o gesso.

Nome do material: gesso		
Massa volúmica seca: $\rho_0 = 1245$ kg/m <sup>3</sup>		Calor específico: $C_0=840$ J/(kg.K)
Porosidade: $\xi = -$ m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>		$U_{sat} = 0,39$ kg/kg
Curva higroscópica:		
HR[–]	U [kg/kg]	
0	0	
70	0,00044	
80	0,00308	
90	0,0065	
95	0,01	
99,92	0,032	
Difusividade higríca: $D_w$ [m <sup>2</sup> /s]		
U [kg/kg]	$D_w$ [m <sup>2</sup> /s]	
0	$4,170 \times 10^{-10}$	
0,02	$4,170 \times 10^{-10}$	
0,04	$5,060 \times 10^{-10}$	
0,06	$1,181 \times 10^{-09}$	
0,08	$2,780 \times 10^{-09}$	
0,1	$1,101 \times 10^{-09}$	
0,12	$4,440 \times 10^{-10}$	
0,14	$3,480 \times 10^{-10}$	
0,16	$3,240 \times 10^{-10}$	
0,18	$3,120 \times 10^{-10}$	
0,2	$3,010 \times 10^{-10}$	
0,22	$2,890 \times 10^{-10}$	
0,24	$2,780 \times 10^{-10}$	
0,26	$2,988 \times 10^{-10}$	
0,28	$3,170 \times 10^{-10}$	
0,30	$3,590 \times 10^{-10}$	
0,32	$8,430 \times 10^{-10}$	
0,34	$2,467 \times 10^{-09}$	
0,36	$5,686 \times 10^{-09}$	
Difusividade higrotérmica: $D_T$ [m <sup>2</sup> /s.K]		
U [kg/kg]	$D_T$ [m <sup>2</sup> /s.K]	
0	0	
0,02	$2,502 \times 10^{-11}$	
0,04	$2,1252 \times 10^{-10}$	
0,06	$2,7163 \times 10^{-10}$	
0,08	$4,4480 \times 10^{-10}$	
0,1	$2,2020 \times 10^{-10}$	
0,12	$1,1100 \times 10^{-10}$	
0,14	$1,1484 \times 10^{-10}$	
0,16	$1,3608 \times 10^{-10}$	
0,18	$1,6224 \times 10^{-10}$	
0,2	$2,0167 \times 10^{-10}$	
0,22	$2,8322 \times 10^{-10}$	
0,24	$3,5306 \times 10^{-10}$	

Nome do material: gesso

Difusividade higrotérmica:  $D_T [m^2/s.K]$

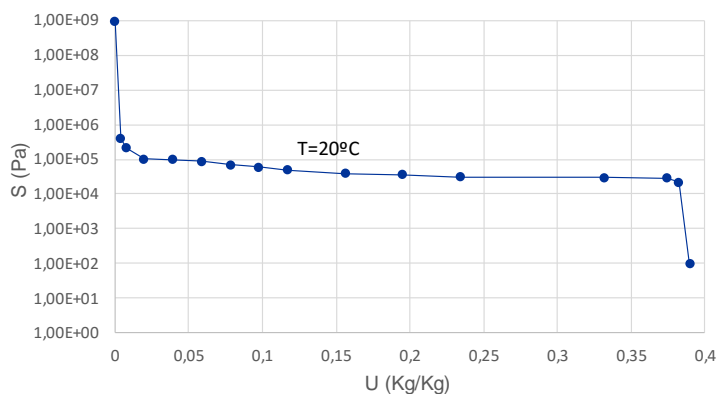
0,26	$4,5296 \times 10^{-10}$
0,28	$5,5792 \times 10^{-10}$
0,30	$7,2159 \times 10^{-10}$
0,32	$1,8968 \times 10^{-09}$
0,34	$4,8600 \times 10^{-09}$
0,36	$5,5723 \times 10^{-09}$

Sucção capilar:  $S [Pa]$

$U [kg/kg]$

$S [Pa]$

0	$9,806 \times 10^8$
0,0039	$3,9224 \times 10^5$
0,0078	$2,1573 \times 10^5$
0,0195	$1,0296 \times 10^5$
0,0390	$9,9040 \times 10^4$
0,0585	$8,8254 \times 10^4$
0,0780	$6,8642 \times 10^4$
0,0975	$5,8836 \times 10^4$
0,1170	$4,9030 \times 10^4$
0,1560	$3,9224 \times 10^4$
0,1950	$3,6282 \times 10^4$
0,2340	$3,1379 \times 10^4$
0,3315	$3,0398 \times 10^4$
0,3744	$2,8437 \times 10^4$
0,3822	$2,1573 \times 10^4$
0,3900	$9,8060 \times 10^1$



Condutibilidade térmica:  $\lambda [W/m.K]$

$U [kg/kg]$

$\lambda, 20^\circ C$

$\lambda, 40^\circ C$

$\lambda, 60^\circ C$

0	0,3580	0,3860	0,4140
0,008	0,4475	0,4825	0,5175
0,0402	0,5012	0,5404	0,5796
0,0803	0,5979	0,6446	0,6914
0,1600	0,6981	0,7527	0,8073
0,2410	0,7804	0,8415	0,9025
0,3200	0,8520	0,9187	0,9853

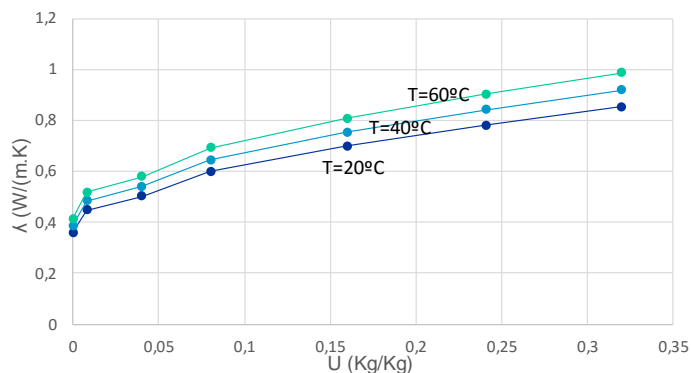


Tabela 15 – Ficha com as propriedades necessárias ao TRHUMIDADE para os painéis de madeira.

Nome do material: Painéis de fibra de madeira		
Massa volúmica seca: $\rho_0 = 480$ kg/m <sup>3</sup>	Calor específico: $C_0=1420\text{J}/(\text{kg.K})$	
Porosidade: $\xi = 0,65 \text{ m}^3/\text{m}^3$	$U_{sat} = 1,35 \text{ kg/kg}$	
Curva higroscópica:		
HR[–]	$U [\text{kg/kg}]$	
0	0	
10	0,0333	
20	0,0533	
30	0,0700	
40	0,0833	
50	0,1000	
60	0,1200	
70	0,1420	
80	0,1733	
90	0,2200	
98	0,2600	
Difusividade higríca: $D_w [\text{m}^2/\text{s}]$		
$U [\text{kg/kg}]$	$D_w [\text{m}^2/\text{s}]$	
0	-	
0,01	$8,553 \times 10^{-10}$	
0,02	$2,632 \times 10^{-10}$	
0,03	$0,877 \times 10^{-10}$	
0,04	$0,439 \times 10^{-10}$	
0,05	$0,439 \times 10^{-10}$	
0,06	$0,658 \times 10^{-10}$	
0,07	$1,096 \times 10^{-10}$	
0,08	$1,754 \times 10^{-10}$	
0,09	$2,961 \times 10^{-10}$	
0,10	$4,276 \times 10^{-10}$	
0,11	$5,702 \times 10^{-10}$	
0,12	$7,127 \times 10^{-10}$	
0,13	$8,772 \times 10^{-10}$	
0,14	$9,430 \times 10^{-10}$	
0,15	$7,895 \times 10^{-10}$	
0,16	$4,386 \times 10^{-10}$	
Difusividade higrotérmica: $D_T [\text{m}^2/\text{s.K}]$		
$U [\text{kg/kg}]$	$D_T [\text{m}^2/\text{s.K}]$	
0	-	
0,01	$2,807 \times 10^{-5}$	
0,02	$1,515 \times 10^{-5}$	
0,03	$1,154 \times 10^{-5}$	
0,04	$1,155 \times 10^{-5}$	
0,05	$2,166 \times 10^{-5}$	
0,06	$3,463 \times 10^{-5}$	
0,07	$4,957 \times 10^{-5}$	
0,08	$6,346 \times 10^{-5}$	
0,09	$7,792 \times 10^{-5}$	
0,10	$8,791 \times 10^{-5}$	
0,11	$9,379 \times 10^{-5}$	
0,12	$9,964 \times 10^{-5}$	
0,13	$1,010 \times 10^{-4}$	

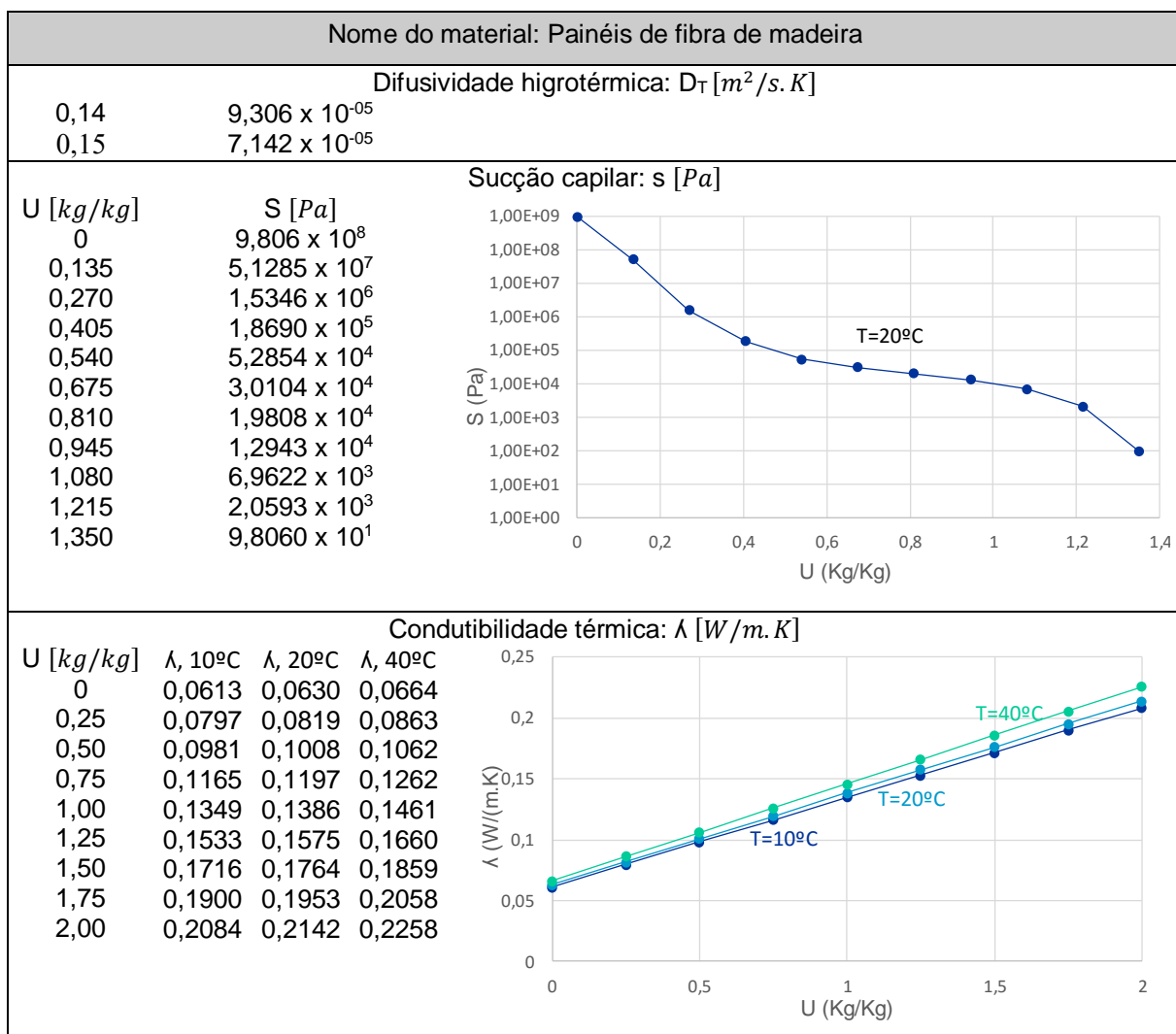
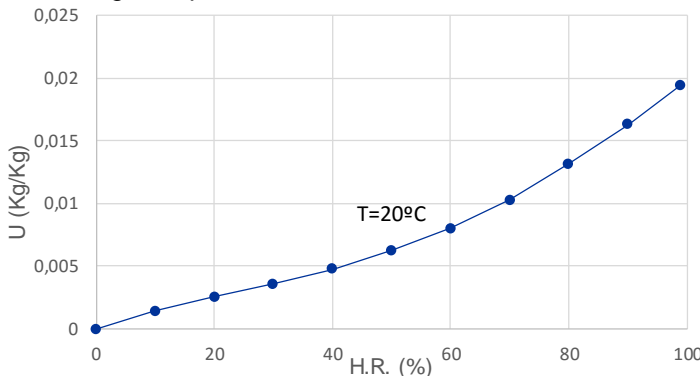
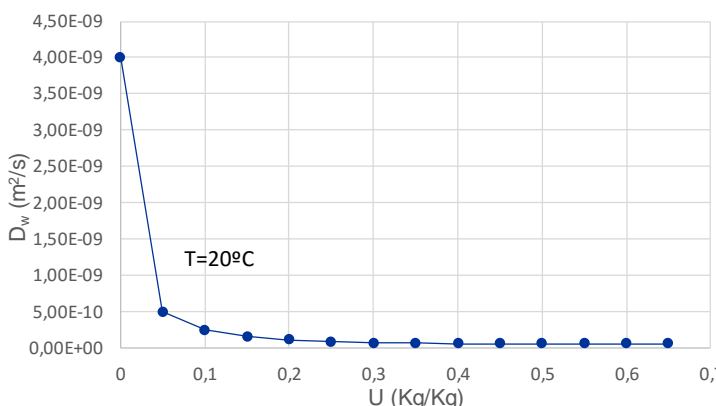
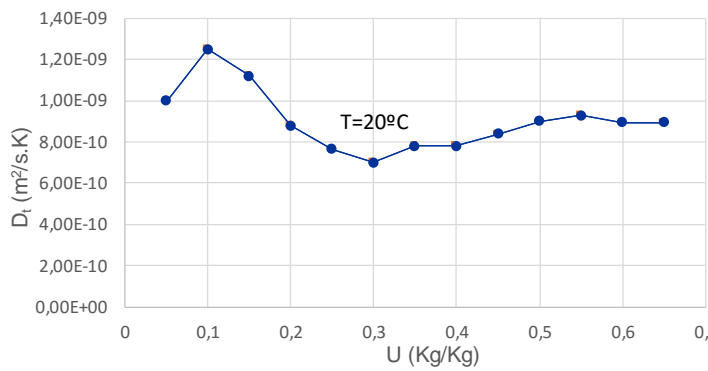


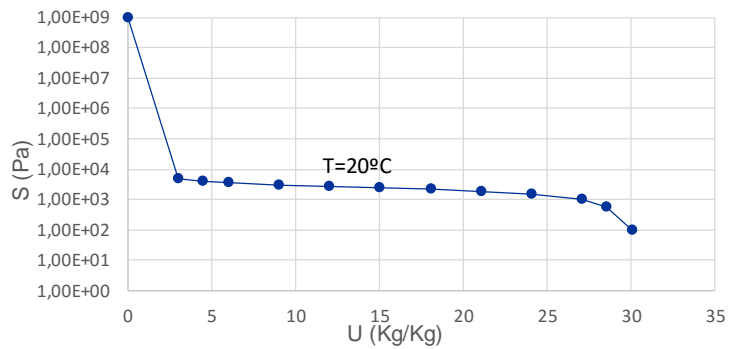
Tabela 16 – Ficha com as propriedades necessárias ao TRHUMIDADE para o poliuretano.

Nome do material: poliuretano		
Massa volúmica seca: $\rho_0 = 31,9$ kg/m <sup>3</sup>	Calor específico: $C_0=1400$ J/(kg.K)	
Porosidade: $\xi = 0,96$ m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	$U_{sat}=30,1$ kg/kg	
Curva higroscópica:		
HR[–]	U [kg/kg]	
0	0	
10	0,00143	
20	0,00257	
30	0,00357	
40	0,00477	
50	0,00628	
60	0,00800	
70	0,01029	
80	0,01314	
90	0,01629	
99	0,01943	
Difusividade higríca: $D_w$ [m <sup>2</sup> /s]		
U [kg/kg]	$D_w$ [m <sup>2</sup> /s]	
0	$4,000 \times 10^{-09}$	
0,05	$5,000 \times 10^{-10}$	
0,10	$2,500 \times 10^{-10}$	
0,15	$1,600 \times 10^{-10}$	
0,20	$1,100 \times 10^{-10}$	
0,25	$8,500 \times 10^{-11}$	
0,30	$7,000 \times 10^{-11}$	
0,35	$6,500 \times 10^{-11}$	
0,40	$6,000 \times 10^{-11}$	
0,45	$6,000 \times 10^{-11}$	
0,50	$6,000 \times 10^{-11}$	
0,55	$5,800 \times 10^{-11}$	
0,60	$5,600 \times 10^{-11}$	
0,65	$5,600 \times 10^{-11}$	
Difusividade higrotérmica: $D_T$ [m <sup>2</sup> /s.K]		
U [kg/kg]	$D_T$ [m <sup>2</sup> /s.K]	
0	-	
0,05	$1,0000 \times 10^{-09}$	
0,10	$1,2500 \times 10^{-09}$	
0,15	$1,1200 \times 10^{-09}$	
0,20	$8,8000 \times 10^{-10}$	
0,25	$7,6500 \times 10^{-10}$	
0,30	$7,0000 \times 10^{-10}$	
0,35	$7,8000 \times 10^{-10}$	
0,40	$7,8000 \times 10^{-10}$	
0,45	$8,4000 \times 10^{-10}$	
0,50	$9,0000 \times 10^{-10}$	
0,55	$9,2800 \times 10^{-10}$	
0,60	$8,9600 \times 10^{-10}$	
0,65	$8,9600 \times 10^{-10}$	

Nome do material: poliuretano

Sucção capilar:  $S$  [Pa]

U [kg/kg]	S [Pa]
0	$9,806 \times 10^8$
3,010	$4,903 \times 10^3$
4,515	$3,922 \times 10^3$
6,020	$3,432 \times 10^3$
9,030	$2,941 \times 10^3$
12,04	$2,696 \times 10^3$
15,05	$2,402 \times 10^3$
18,06	$2,108 \times 10^3$
21,07	$1,863 \times 10^3$
24,08	$1,568 \times 10^3$
27,09	$1,029 \times 10^3$
28,595	$5,884 \times 10^2$
30,100	$9,806 \times 10^1$



Condutibilidade térmica:  $\lambda$  [W/m.K]

U [kg/kg]	$\lambda$ , 10°C	$\lambda$ , 40°C	$\lambda$ , 70°C
0	0,0248	0,0256	0,0277
5	0,0260	0,0268	0,0290
10	0,0270	0,0279	0,0302
15	0,0279	0,0287	0,0311

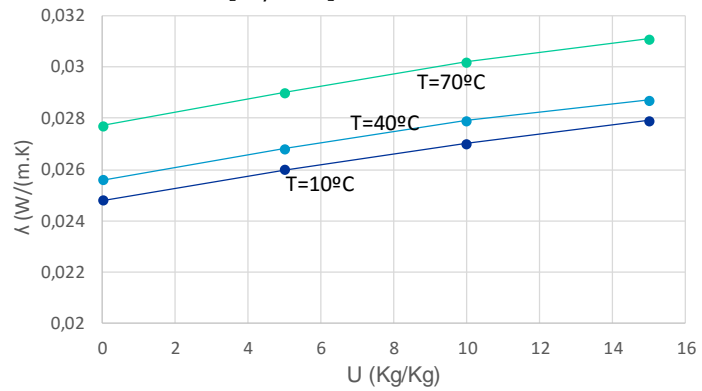
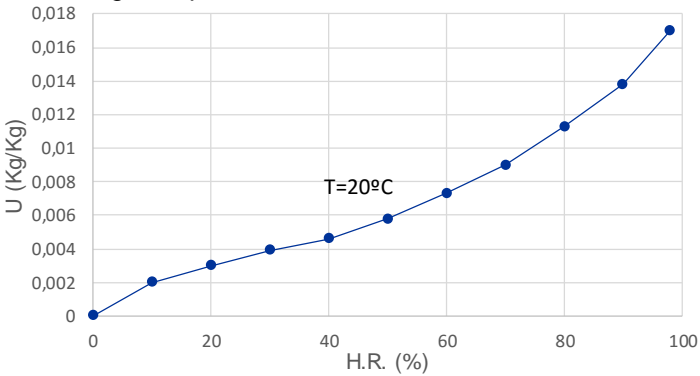
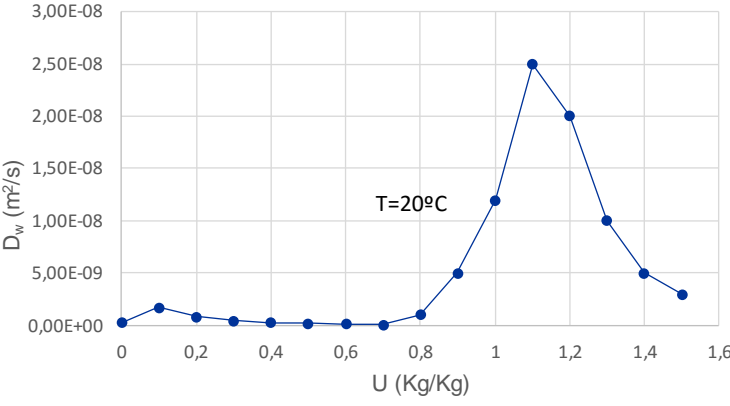
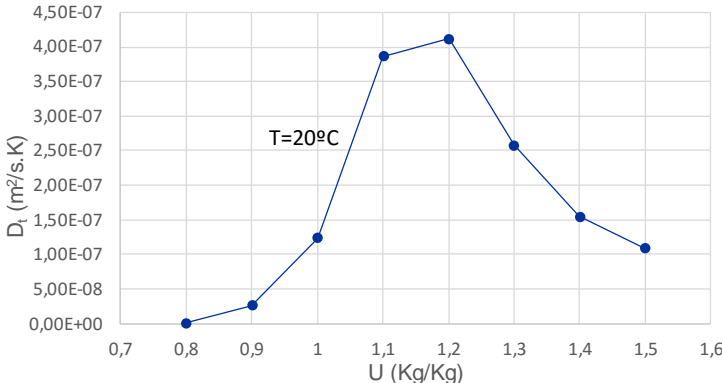




Tabela 17 – Ficha com as propriedades necessárias ao TRHUMIDADE para o poliestireno expandido

Nome do material: Poliestireno expandido		
Massa volúmica seca: $\rho_0 = 10,3$ kg/m <sup>3</sup>		Calor específico: $C_0=1380$ J/(kg.K)
Porosidade: $\xi = 0,99$ m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>		$U_{sat}=9,61$ kg/kg
Curva higroscópica:		
HR[–]	U [kg/kg]	
0	0	
10	0,002	
20	0,003	
30	0,0039	
40	0,0046	
50	0,0058	
60	0,0073	
70	0,0090	
80	0,0113	
90	0,0138	
98	0,017	
Difusividade higríca: $D_w$ [m <sup>2</sup> /s]		
U [kg/kg]	$D_w$ [m <sup>2</sup> /s]	
0	$2,500 \times 10^{-10}$	
0,1	$1,700 \times 10^{-09}$	
0,2	$8,000 \times 10^{-10}$	
0,3	$4,500 \times 10^{-10}$	
0,4	$2,500 \times 10^{-10}$	
0,5	$1,800 \times 10^{-10}$	
0,6	$1,200 \times 10^{-10}$	
0,7	$1,000 \times 10^{-10}$	
0,8	$1,000 \times 10^{-09}$	
0,9	$5,000 \times 10^{-09}$	
1,0	$1,200 \times 10^{-08}$	
1,1	$2,500 \times 10^{-08}$	
1,2	$2,000 \times 10^{-08}$	
1,3	$1,000 \times 10^{-08}$	
1,4	$5,000 \times 10^{-09}$	
1,5	$3,000 \times 10^{-09}$	
Difusividade higrotérmica: $D_T$ [m <sup>2</sup> /s.K]		
U [kg/kg]	$D_T$ [m <sup>2</sup> /s.K]	
0,8	$7,000 \times 10^{-10}$	
0,9	$2,575 \times 10^{-08}$	
1,0	$1,236 \times 10^{-07}$	
1,1	$3,863 \times 10^{-07}$	
1,2	$4,120 \times 10^{-07}$	
1,3	$2,575 \times 10^{-07}$	
1,4	$1,545 \times 10^{-07}$	
1,5	$1,082 \times 10^{-07}$	

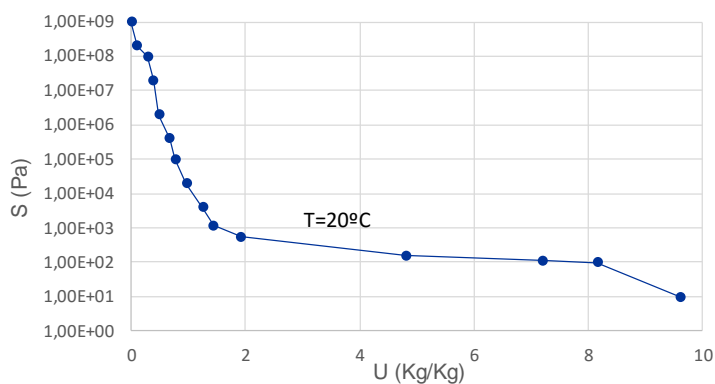
Nome do material: Poliestireno expandido

Sucção capilar:  $S$  [Pa]

$U$  [kg/kg]

$S$  [Pa]

0	$9,8060 \times 10^8$
0,0961	$1,9612 \times 10^8$
0,2883	$9,806 \times 10^7$
0,3844	$1,9612 \times 10^7$
0,4805	$1,9612 \times 10^6$
0,6727	$3,9224 \times 10^5$
0,7688	$9,806 \times 10^4$
0,9610	$1,9612 \times 10^4$
1,2493	$3,9224 \times 10^3$
1,4415	$1,1767 \times 10^3$
1,9220	$5,3933 \times 10^2$
4,8050	$1,5689 \times 10^2$
7,2075	$1,0787 \times 10^2$
8,1685	$9,806 \times 10^1$
9,6100	$9,806 \times 10^0$



Condutibilidade térmica:  $\lambda$  [W/m.K]

$U$  [Kg/Kg]

$U$ [Kg/Kg]	$\lambda$ , 10°C	$\lambda$ , 30°C	$\lambda$ , 60°C
0	0,0375	0,0398	0,0432
2	0,0398	0,0422	0,0458
4	0,0410	0,0435	0,0472
6	0,0420	0,0446	0,0484

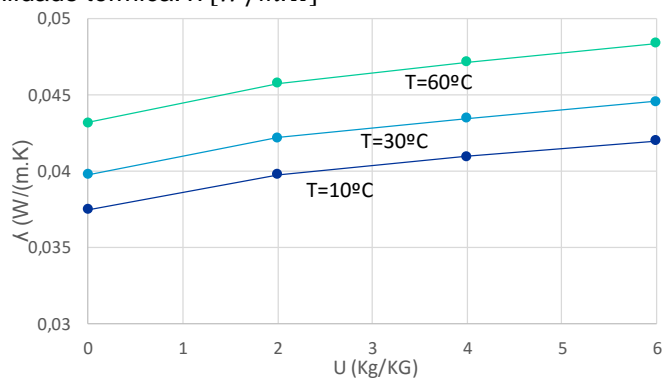


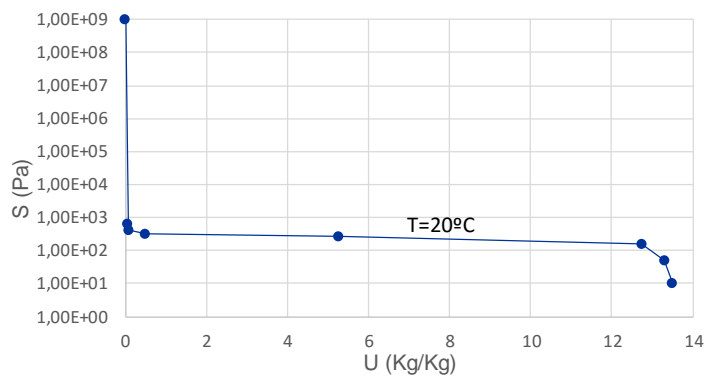
Tabela 18 – Ficha com as propriedades necessárias ao TRHUMIDADE para a lã de vidro.

Nome do material: Lã de vidro		
Massa volúmica seca: $\rho_0 = 77 \text{ kg/m}^3$	Calor específico: $c_0 = 800 \text{ J/(kg.K)}$	
Porosidade: $\xi = 0,89 \text{ m}^3/\text{m}^3$	$U_{sat} = 13,5 \text{ kg/kg}$	
HR[–]	U [kg/kg]	Curva higroscópica:
0	0	
10	0,00016	
20	0,00039	
30	0,00068	
40	0,00100	
50	0,00129	
60	0,00157	
70	0,00179	
80	0,02140	
90	0,0030	
99	0,0050	
U [kg/kg]	$D_w [m^2/s]$	Difusividade hídrica: $D_w [m^2/s]$
0	$2,000 \times 10^{-08}$	
0,05	$1,000 \times 10^{-09}$	
0,10	$5,000 \times 10^{-10}$	
0,15	$3,500 \times 10^{-10}$	
0,20	$3,000 \times 10^{-10}$	
0,25	$2,800 \times 10^{-10}$	
0,30	$2,500 \times 10^{-10}$	
0,35	$2,400 \times 10^{-10}$	
0,40	$2,300 \times 10^{-10}$	
0,45	$2,200 \times 10^{-10}$	
0,50	$2,100 \times 10^{-10}$	
0,55	$2,050 \times 10^{-10}$	
0,60	$2,000 \times 10^{-10}$	
0,65	$2,000 \times 10^{-10}$	
0,70	$2,500 \times 10^{-10}$	
0,75	$3,000 \times 10^{-10}$	
0,80	$4,000 \times 10^{-10}$	
0,85	$6,000 \times 10^{-10}$	
U [kg/kg]	$D_T [m^2/s.K]$	Difusividade higrotérmica: $D_T [m^2/s.K]$
0,30	$2,5000 \times 10^{-11}$	
0,35	$2,4000 \times 10^{-10}$	
0,40	$1,1500 \times 10^{-09}$	
0,45	$2,2000 \times 10^{-09}$	
0,50	$3,1500 \times 10^{-09}$	
0,55	$3,4850 \times 10^{-09}$	
0,60	$3,6000 \times 10^{-09}$	
0,65	$3,6000 \times 10^{-09}$	
0,70	$4,7500 \times 10^{-09}$	
0,75	$5,7000 \times 10^{-09}$	
0,80	$8,0000 \times 10^{-09}$	
0,85	$1,2000 \times 10^{-08}$	

Nome do material: Lã de vidro

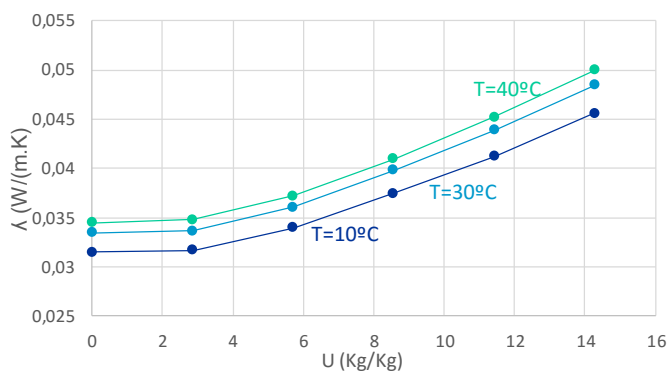
Sucção capilar:  $S$  [Pa]

$U$ [kg/kg]	$S$ [Pa]
0	$9,8060 \times 10^8$
0,0594	$6,2758 \times 10^2$
0,0810	$4,0695 \times 10^2$
0,4995	$3,1379 \times 10^2$
5,2515	$2,6476 \times 10^2$
12,744	$1,5690 \times 10^2$
13,298	$4,9030 \times 10^1$
13,5	$9,8060 \times 10^0$



Condutibilidade térmica:  $\lambda$  [W/m.K]

$U$ [kg/kg]	$\lambda$ , 10°C	$\lambda$ , 30°C	$\lambda$ , 40°C
0	0,0315	0,0335	0,0345
2,875	0,0317	0,0337	0,0348
5,714	0,0340	0,0361	0,0372
8,571	0,0375	0,0398	0,0410
11,428	0,0412	0,0439	0,0452
14,286	0,0456	0,0485	0,0500



### 3.11. SÍNTESE DO CAPÍTULO

O objetivo final proposto para este capítulo consistia em classificar as 8 propriedades necessárias à execução do programa TRHUMIDADE, quanto à exigência do processo experimental envolvido na sua determinação, bem como averiguar a disponibilidade na literatura de cada um dos parâmetros. Assim, na sequência do trabalho de pesquisa efetuado anteriormente, estabeleceu-se uma escala de classificação, dividida nas seguintes classes:

- Determinação experimental:**

**Grau de dificuldade:**

Simples – Não exige nem formação do técnico nem meios complexos

Moderado – Exige equipamentos complexos

Complexo – Formação dos técnicos qualificada e equipamentos sofisticados

**Velocidade do ensaio:**

Lento – muitos dias

Rápido – poucos ou menos de 1 dia

- Disponibilidade na literatura:**

Fácil – muitas publicações dispõem destes valores

Difícil – só algumas publicações dispõem destes valores

Muito difícil – muito poucas publicações apresentam esses resultados

Na Tabela 19, aplica-se a proposta de escala anterior para caracterizar cada um dos parâmetros.

Tabela 19 – Avaliação das propriedades quanto ao processo de determinação experimental e disponibilidade na literatura.

Propriedade	Determinação experimental		Disponibilidade na literatura
	Grau de dificuldade	Velocidade do ensaio	
Massa volúmica seca, $\rho_0$ [Kg/m³]	Simples	Rápido	Fácil
Calor específico, $C_0$ [J/Kg.K]	Moderado	Rápido	Fácil
Porosidade, $\xi$ [m³/m³]	Método das pesagens		Difícil
	Simples	Rápido	
	Método do porosímetro de mercúrio		
	Complexo	Rápido	
Curva higroscópica	Simples	Lento	Difícil
Difusividade higríca, $D_w$ [m²/s]	Complexo	Lento	Muito difícil
Difusividade higrotérmica, $D_T$ [m²/s.K]	Complexo	Lento	Muito difícil
Condutibilidade térmica, $\lambda$ [W/m.K]	Método GPH		Difícil
	Moderado	Lento	
	Método do choque térmico		
	Moderado	Rápido	
Sucção capilar, $S$ [Pa]	Complexo	Lento	Muito difícil

As conclusões obtidas através deste capítulo são fundamentais para o estudo de sensibilidade realizado no capítulo 4. De facto, se determinada propriedade demonstrar ter um peso relevante nos resultados obtidos nas simulações, é importante que o seu valor seja obtido experimentalmente para o material em estudo, e que não resulte de aproximações por semelhança com outros materiais de características similares. Nesse sentido, é fundamental perceber o grau de dificuldade do ensaio envolvido. Por outro lado, se a análise de sensibilidade evidenciar que determinada propriedade pouco influencia os resultados, então o valor inserido nas simulações a realizar, pode resultar de valores encontrados na bibliografia para elementos com propriedades idênticas. A situação ideal seria que as propriedades com grande influência nos resultados fossem fáceis de obter experimentalmente ou estivessem disponíveis na literatura. Para os parâmetros menos influentes, a adoção de valores característicos de elementos similares não é tão relevante, pelo que a complexidade dos ensaios perde importância. Assim, não haverá necessidade de determinar as propriedades todas de um material a simular, quando a utilização de uma gama de valores aproximados não influenciará os resultados.

# 4

## ESTUDO DE SENSIBILIDADE DAS PROPRIEDADES ENVOLVIDAS NO TRHUMIDADE NUM PROCESSO DE EMBEBIÇÃO

### 4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo procurou-se analisar a influência das propriedades dos materiais, necessárias como dados de entrada para a execução do programa TRHUMIDADE, em processos de absorção de água. Realizaram-se cerca de 390 simulações, das quais apenas 201 se apresentam nesta dissertação, de modo a classificar o grau de influência que cada propriedade exerce nos perfis do teor de humidade em embebição. Também se apresentam os resultados obtidos em estudos anteriores sobre a influência que outros fatores, que não as propriedades dos materiais, provocam nos perfis de embebição/secagem de materiais de construção porosos.

### 4.2. ESTUDOS ANTERIORES

A importância da simulação numérica dos fenómenos de transferência conjunta de calor e humidade, justificou a utilização e estudo do programa TRHUMIDADE, após o seu desenvolvimento, por alguns autores. *Maria Clara Vale* [29], desenvolveu uma nova aplicação, a partir do programa anterior, cujo principal objetivo consistia em melhorar a interface com o utilizador – TrHUM98 – desenvolvido em visual basic 5.0 para plataforma Windows 95, permitindo uma relação com o utilizador comum, de forma mais intuitiva e com sistemas de ajuda interativa. Apesar do programa TrHUM98, continuar a apresentar restrições ao nível da base de dados dos materiais e do número de camadas do elemento possíveis de considerar, as conclusões obtidas por *Maria Clara Vale* acrescentam e reforçam alguns dos resultados deste trabalho. As análises de sensibilidade efetuadas pela autora, ainda que não referentes à influência das propriedades dos materiais no processo de embebição, permitiram caracterizar a influência dos seguintes fatores:

- Intervalo de tempo da simulação (intervalo de tempo definido para a malha temporal,  $\Delta t$ );
- Condições iniciais (temperatura e humidade dos materiais);
- Condicionantes climáticos (temperatura e humidade relativa exterior e interior).

Os resultados obtidos revelaram que:

- Quando as simulações são efetuadas em clima constante, o intervalo de tempo definido para a malha temporal, não tem praticamente influência sobre o resultado final da simulação, isto é,

sobre os perfis do teor de humidade. Contudo, para efetuar simulações com clima variável, quanto menor for o intervalo de tempo,  $\Delta t$ , melhor será a aproximação à realidade.

- A distribuição inicial de temperaturas num material, não tem praticamente influência na evolução dos perfis do teor de humidade, mesmo para períodos relativamente curtos de simulação. Por outro lado, os perfis iniciais do teor de humidade são determinantes na evolução da frente húmida ao longo do tempo, fundamentalmente nos processos de secagem dos materiais.
- A humidade relativa ambiente tem uma influência determinante na evolução dos perfis do teor de humidade num processo de secagem, sendo menos evidente essa influência durante a embebição.

O conhecimento e o estabelecimento das condições a adotar nas simulações é fundamental para a correta reprodução dos fenómenos reais. Nesse sentido, é fundamental compreender quais os parâmetros verdadeiramente determinantes nos resultados. O estudo da influência das propriedades dos materiais, efetuada nos subcapítulos seguintes, pretende contribuir para essa sistematização, categorizando as propriedades com mais repercussões nos resultados, que por esse motivo exigem a introdução de valores rigorosos característicos de cada material.

### 4.3. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

#### 4.3.1. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DAS 8 PROPRIEDADES NECESSÁRIAS AO PROGRAMA

Com o objetivo de efetuar um estudo de sensibilidade, utilizando o TRHUMIDADE, no processo de absorção de água em materiais de construção porosos, fez-se uma avaliação das 8 propriedades necessárias ao programa, alterando individualmente cada um dos parâmetros, enquanto todos os restantes se mantêm constantes. Os valores de base para o estudo de sensibilidade, correspondem às características reais de cada um dos materiais estudados: o barro vermelho e o betão celular, já apresentados ao longo do capítulo 2. Refira-se que a porosidade não foi estudada neste trabalho, pelo facto de não intervir diretamente nas equações conjuntas de transferência de calor e humidade, sendo apenas utilizada para determinar o teor de humidade máximo. No caso da sucção, como intervém apenas quando há uma interface entre duas camadas, as simulações realizadas serviram somente para confirmar a ausência de influência quando se analisa elementos monolíticos. Na Tabela 20, identifica-se o princípio das simulações efetuadas, que serão detalhas nos subcapítulos 4.3.1.1 a 4.3.1.8.

Tabela 20 – Princípio das simulações efetuadas em cada subcapítulo.

Subcapítulos e simulações	$\rho_0$	$C_s$	$\xi$	C. Higroscópica	S	$D_w$	$D_T$	$\lambda$
4.3.1.1	↗ ↘	const.	const.	const.	const.	const.	const.	const.
4.3.1.2	const.	↗ ↘	const.	const.	const.	const.	const.	const.
4.3.1.3	-	-	-	-	-	-	-	-
4.3.1.4	const.	const.	const.	↗ ↘	const.	const.	const.	const.
4.3.1.5	-	-	-	-	-	-	-	-
4.3.1.6	const.	const.	const.	const.	const.	↗ ↘	const.	const.
4.3.1.7	const.	const.	const.	const.	const.	const.	↗ ↘	const.
4.3.1.8	const.	const.	const.	const.	const.	const.	const.	↗ ↘

Em que,

- ↗ ↘ – Variação da propriedade, por aumento e diminuição do seu valor
- Const. – Os valores das restantes propriedades são mantidos constantes



Atendendo a que se executaram centenas de simulações, no corpo da dissertação apresentam-se apenas os resultados mais relevantes e a sua justificação, incluindo-se em anexos os resultados complementares.

#### 4.3.1.1. MASSA VOLÚMICA SECA

Com o intuito de avaliar a influência que a massa volúmica seca assume nos fenómenos de embebição de materiais porosos, realizou-se um conjunto de simulações, onde se variou o valor de  $\rho_0$ , admitindo materiais teóricos cujas restantes propriedades são constantes, apesar de na realidade se saber que tais variações provocam modificações nas restantes propriedades. A noção da gama de valores de  $\rho_0$  a simular para cada um dos elementos, foi conseguida após o trabalho de pesquisa realizado no capítulo 3. De facto, uma das preocupações comuns ao estudo de sensibilidade elaborado para cada uma das propriedades, foi a adequação da ordem de grandeza das variações inseridas. No caso da massa volúmica seca, houve o cuidado de não se realizar o estudo de sensibilidade com valores superiores a  $11300 \text{ kg/m}^3$  (característicos de materiais pesados), nem inferiores a  $60 \text{ kg/m}^3$  (característicos de materiais de isolamento térmico) [7]. Deste modo, a gama de variação da massa volúmica obteve-se através de um acréscimo e redução de 20% e 50%, face aos reais valores de  $\rho_0$  de cada um dos materiais, que no caso do barro vermelho é de  **$1925 \text{ kg/m}^3$** , e no betão celular é de  **$525 \text{ kg/m}^3$** . Na Tabela 21 é possível visualizar os valores utilizados no estudo de sensibilidade.

Tabela 21 – Gama de valores adotados no estudo de sensibilidade de  $\rho_0$ , para cada um dos materiais

Massa volúmica seca $\rho_0$ [ $\text{kg/m}^3$ ]	• Barro vermelho	$\rho_0 \times 1,5$ : $\rho_0=2887,5 \text{ kg/m}^3$
		$\rho_0 \times 1,2$ : $\rho_0=2310,0 \text{ kg/m}^3$
		<b><math>\rho_0 = 1925,0 \text{ kg/m}^3</math></b>
		$\rho_0 \times 0,8$ : $\rho_0=1540 \text{ kg/m}^3$
		$\rho_0 \times 0,5$ : $\rho_0=962,5 \text{ kg/m}^3$
	• Betão celular	$\rho_0 \times 1,5$ : $\rho_0=787,5 \text{ kg/m}^3$
		$\rho_0 \times 1,2$ : $\rho_0=630,0 \text{ kg/m}^3$
		<b><math>\rho_0=525,0 \text{ kg/m}^3</math></b>
		$\rho_0 \times 0,8$ : $\rho_0=420,0 \text{ kg/m}^3$
		$\rho_0 \times 0,5$ : $\rho_0=262,5 \text{ kg/m}^3$



A análise de sensibilidade da influência da massa volúmica seca nos perfis de embebição, implicou a realização de 75 simulações, referenciadas na Tabela 22. As simulações apresentadas no capítulo 2, para o barro vermelho e para o betão celular, consideradas configurações de referência, são no estudo de  $\rho_0$  designadas por **8-BV $\rho$**  e **8-BC $\rho$** . A influência da massa volúmica seca nos perfis do teor de humidade ao longo do tempo, foi obtida para as características da ambiência definidas nessa situação de referência, variando  $\rho_0$  dentro da gama de valores estabelecida para cada material. Esse estudo corresponde ao representado na Figura 24 e na Figura 25, sendo na Tabela 22 referido pelas cores  e .

Tabela 22 – Descrição das simulações efetuadas para o estudo de sensibilidade de  $\rho_0$ .

Exterior		Interior		$\rho_0$ [kg/m <sup>3</sup> ]		Ref. Material	
HR <sub>ext</sub>	T <sub>ext</sub>	T <sub>int</sub>	HR <sub>int</sub>	Barro V.	Betão C.	Barro V.	Betão C.
100%	25°C	25°C	10%	2887,5	787,5	1-BVp	1-BCp
				2310,0	630,0	2-BVp	2-BCp
				1925,0	525,0	3-BVp	3-BCp
				1540	420,0	4-BVp	4-BCp
				962,5	262,5	5-BVp	5-BCp
			50%	2887,5	787,5	6-BVp	6-BCp
				2310,0	630,0	7-BVp	7-BCp
				<b>1925,0</b>	<b>525,0</b>	<b>8-BVp</b>	<b>8-BCp</b>
				1540	420,0	9-BVp	9-BCp
				962,5	262,5	10-BVp	10-BCp
			65%	-	787,5	-	11-BCp
				-	630,0	-	12-BCp
				-	525,0	-	13-BCp
				-	420,0	-	14-BCp
				-	262,5	-	15-BCp
			70%	-	787,5	-	16-BCp
				-	630,0	-	17-BCp
				-	525,0	-	18-BCp
				-	420,0	-	19-BCp
				-	262,5	-	20-BCp
			75%	-	787,5	-	21-BCp
				-	630,0	-	22-BCp
				-	525,0	-	23-BCp
				-	420,0	-	24-BCp
				-	262,5	-	25-BCp
			80%	-	787,5	-	26-BCp
				-	630,0	-	27-BCp
				-	525,0	-	28-BCp
				-	420,0	-	29-BCp
				-	262,5	-	30-BCp
			85%	-	787,5	-	31-BCp
				-	630,0	-	32-BCp
				-	525,0	-	33-BCp
				-	420,0	-	34-BCp
				-	262,5	-	35-BCp
			90%	2887,5	787,5	11-BVp	36-BCp
				2310,0	630,0	12-BVp	37-BCp
				1925,0	525,0	13-BVp	38-BCp
				1540	420,0	14-BVp	39-BCp
				962,5	262,5	15-BVp	40-BCp
			95%	-	787,5	-	41-BCp
				-	630,0	-	42-BCp
				-	525,0	-	43-BCp
				-	420,0	-	44-BCp
				-	262,5	-	45-BCp
			100%	-	787,5	-	46-BCp
				-	630,0	-	47-BCp
				-	525,0	-	48-BCp
				-	420,0	-	49-BCp
				-	262,5	-	50-BCp
	10°C	25°C	50%	2887,5	787,5	16-BVp	51-BCp
				2310,0	630,0	17-BVp	52-BCp
				1925,0	525,0	18-BVp	53-BCp
				1540	420,0	19-BVp	54-BCp
				962,5	262,5	20-BVp	55-BCp

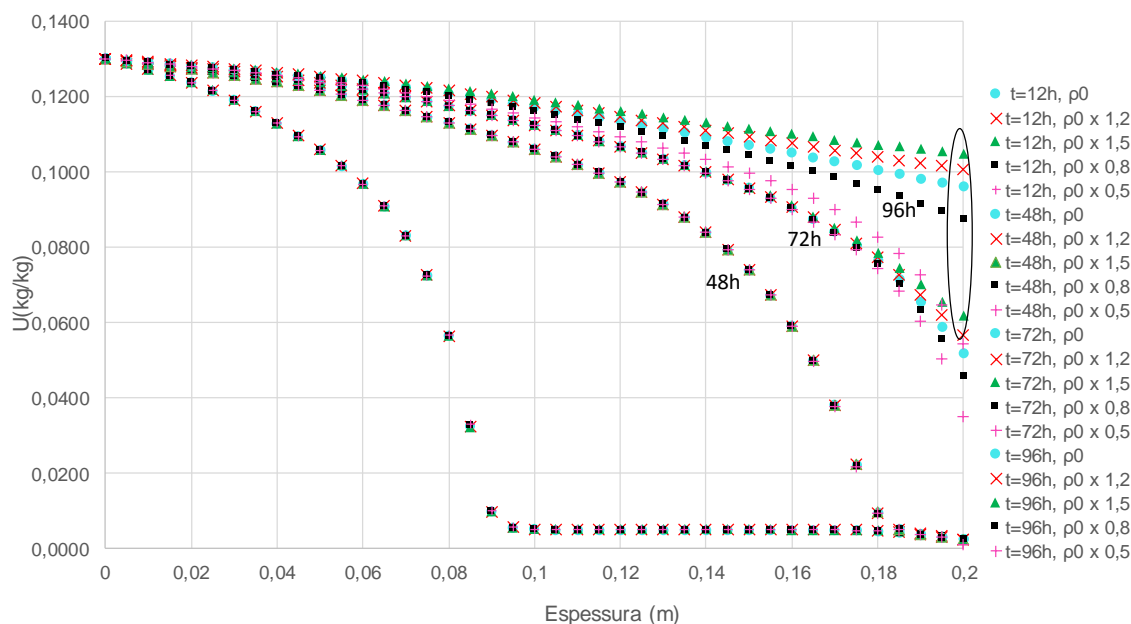


Figura 24 – Variação dos perfis do teor de umidade em embebição face à variação da massa volúmica seca do barro vermelho, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 6-BVp, 7-BVp, **8-BVp**, 9-BVp e 10-BVp).

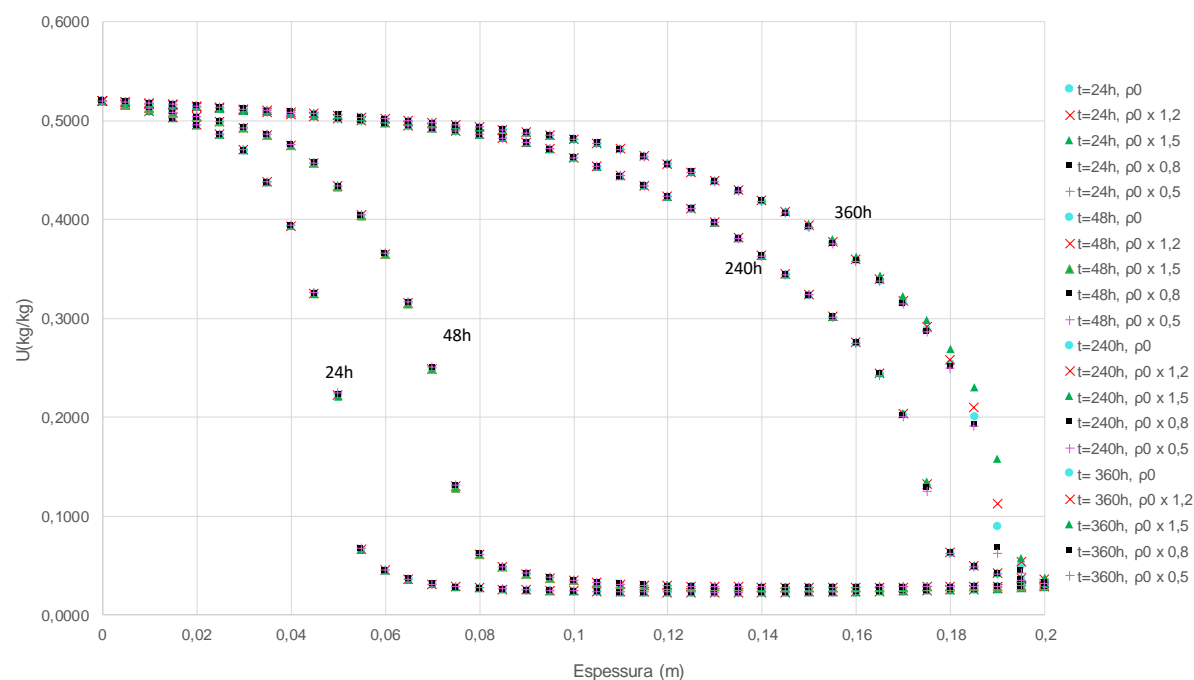


Figura 25 – Variação dos perfis do teor de umidade em embebição face à variação da massa volúmica seca do betão celular, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 6-BCp, 7-BCp, **8-BCp**, 9-BCp e 10-BCp).




A análise da Figura 24 e da Figura 25, permite retirar as seguintes conclusões:

- Variações na massa volúmica seca do material só provocam dispersões nos resultados, nas proximidades da superfície de separação interior, quando o teor de humidade é elevado (domínio capilar), isto é, quando a frente húmida atinge a face interior do elemento em estudo;
- Nessas condições, a influência da massa volúmica seca é tal que: quanto maior é o valor de  $\rho_0$ , maiores são os teores de humidade atingidos na face interior do material, e pelo contrário, menores valores da massa volúmica seca repercutem-se em menores teores de humidade. Tal situação é visível no barro vermelho ao fim de 96 horas de embebição, onde o perfil a azul (**8-BVp**), correspondente à configuração de referência, é inferior ao perfil a verde (6-BVp), mas superior ao perfil rosa (10-BVp);
- Para o betão celular, a influência de  $\rho_0$  no processo de embebição é menos notória, à semelhança do que se verifica nas primeiras horas do barro vermelho. Este aspeto prende-se com o facto da progressão da frente húmida ainda não ter atingido a face interior do material, sendo os teores de humidade em causa muito baixos (domínio higroscópico).

Se a análise de sensibilidade da massa volúmica seca termina-se no conjunto de simulações apresentadas na Figura 24 e na Figura 25, muito provavelmente seríamos encaminhados a retirar algumas conclusões menos acertadas. Como por exemplo,  $\rho_0$  só influencia o processo de embebição de materiais de construção porosos quando a massa volúmica seca dos elementos é elevada, atendendo a que no barro vermelho as mudanças são evidentes, mas no betão celular são pouco significativas. Além disso, iria prevalecer a ideia de que esta propriedade desempenha um papel significativo na transferência de calor e humidade nos materiais porosos. Enquanto que na realidade, as novas simulações efetuadas vieram eliminar algumas dúvidas, demonstrando que o que condiciona verdadeiramente os resultados é o fenómeno de secagem que ocorre na superfície interior do elemento em estudo.

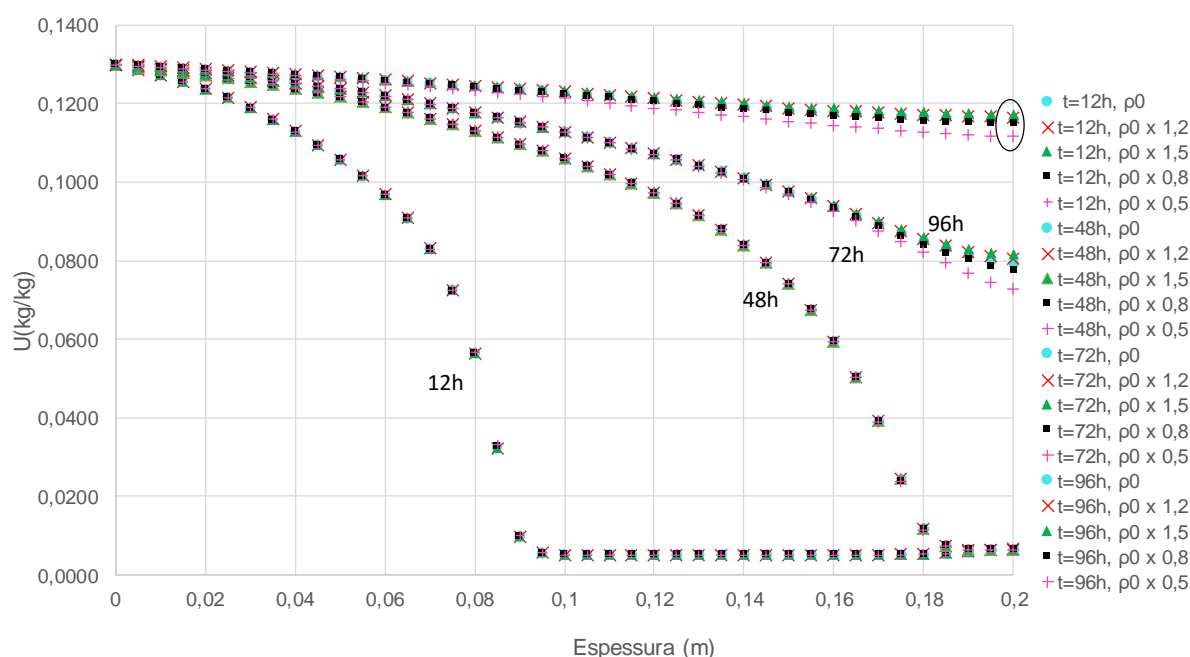
Assim, para ambos os materiais, realizaram-se simulações adicionando um gradiente de temperatura, e variando a HR do ambiente interior. No caso do betão celular, a gama de HR interiores simuladas foi mais vasta, uma vez que houve necessidade de procurar condições propícias para que a frente húmida atingisse a face interior do elemento. Só quando se diminuía o fluxo de secagem, por aumento da HR interior, é que o domínio capilar era atingido na superfície interior do betão celular. Na Tabela 23, apresenta-se o conjunto de simulações incluídas no corpo da dissertação, e organizam-se as presentes em anexo, de acordo com a simbologia já apresentada na Tabela 22.

Tabela 23 – Organização das simulações.

Simulações		Descrição	Localização			
		Gradiente de temperatura	Anexo 6			
			16-BVp	51-BCp		
			17-BVp	52-BCp		
			18-BVp	53-BCp		
			19-BVp	54-BCp		
			20-BVp	55-BCp		
		Variação da HR <sub>int</sub>	Corpo da dissertação			
			Figura 26	Figura 28		
			Figura 27	Figura 29		
		Variação da HR <sub>int</sub>	Anexo 6			
			1-BCp	11-BCp	36-BCp	46-BCp
			2-BCp	...	37-BCp	47-BCp
			3-BCp	...	38-BCp	48-BCp
			4-BCp	...	39-BCp	49-BCp
			5-BCp	30-BCp	40-BCp	50-BCp

Os resultados das simulações (16-BVp a 20-BVp e 51-BCp a 55-BCp), presentes no anexo 6, revelaram principalmente para o barro vermelho, que a introdução de um gradiente de temperatura provoca a longo prazo, teores de humidade mais elevados e menos dispersos para as diferentes massas volúmicas analisadas, comparativamente com as simulações efetuadas nas condições de referência presentes na Figura 24.

Na Figura 26 e na Figura 27, apresentam-se os resultados das simulações para o barro vermelho, considerando uma  $HR_{int}$  de 90% e de 10%, respetivamente. A Figura 28 e Figura 29, correspondem ao mesmo estudo para o betão celular, apenas utilizando uma  $HR_{int}$  de 95% e 85%, respetivamente. O conjunto de simulações referidas corresponde aos grupos indicados por ■ e ■.



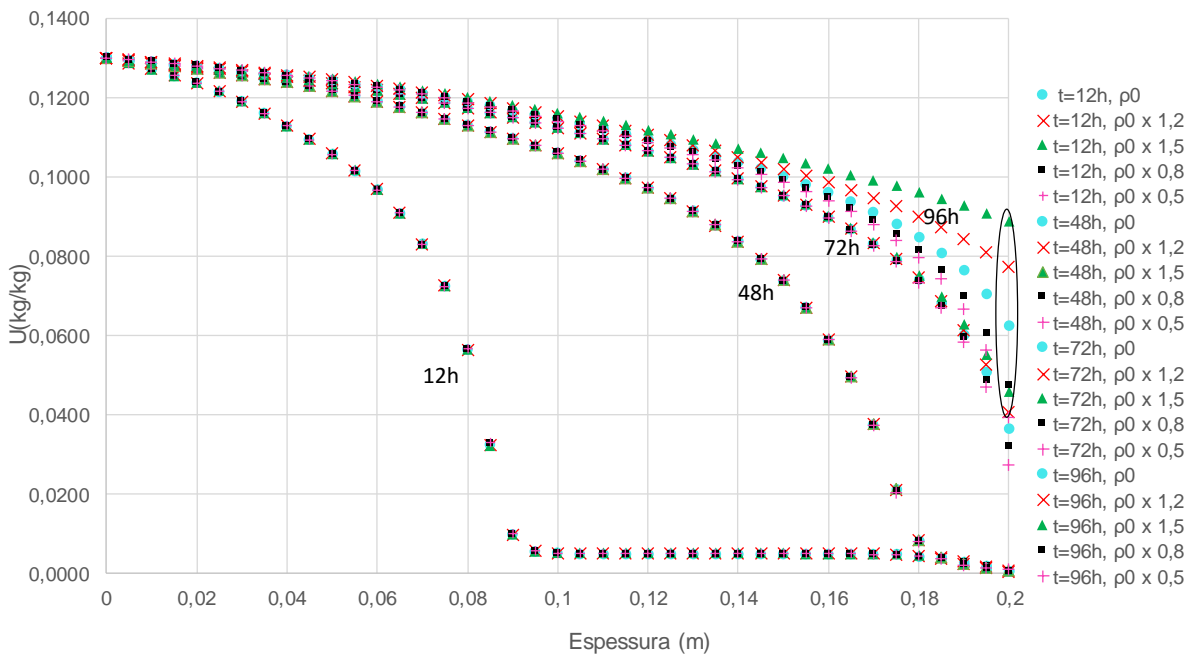


Figura 27 – Variação dos perfis do teor de umidade em embebição face à variação da massa volúmica seca do barro vermelho, considerando uma  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=10\%$  (simulações: 1-BVp, 2-BVp, 3-BVp, 4-BVp, e 5-BVp).

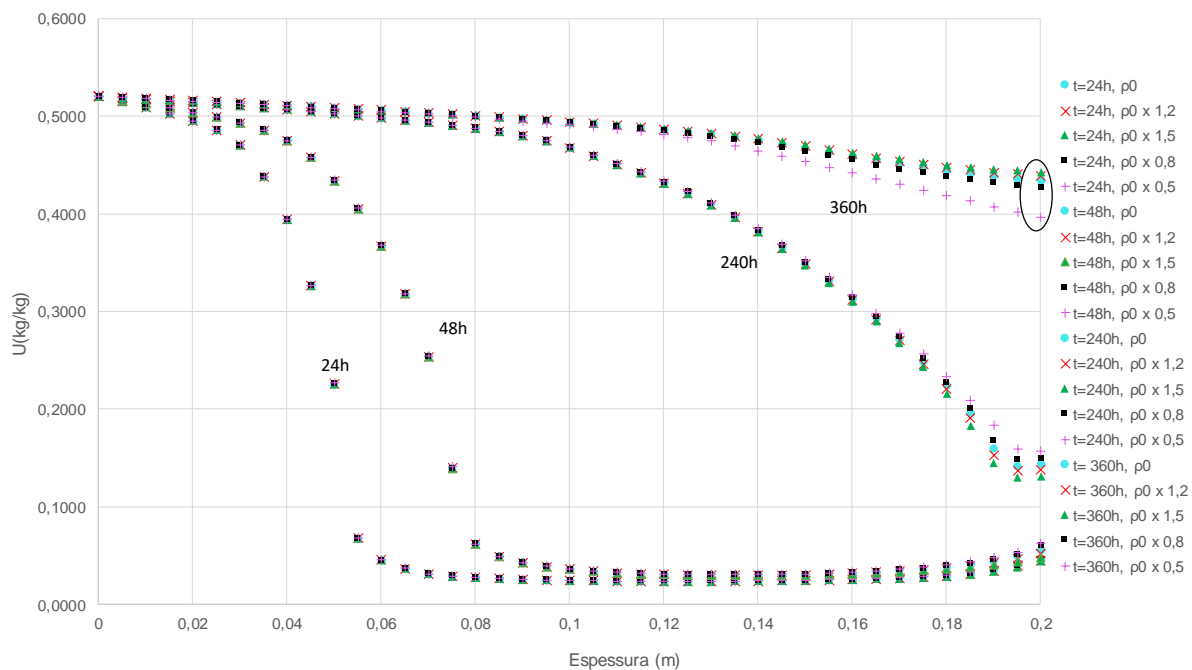


Figura 28 – Variação dos perfis do teor de umidade em embebição face à variação da massa volúmica seca do betão celular, considerando uma  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=95\%$  (simulações: 41-BCp, 42-BCp, 43-BCp, 44-BCp e 45-BCp).

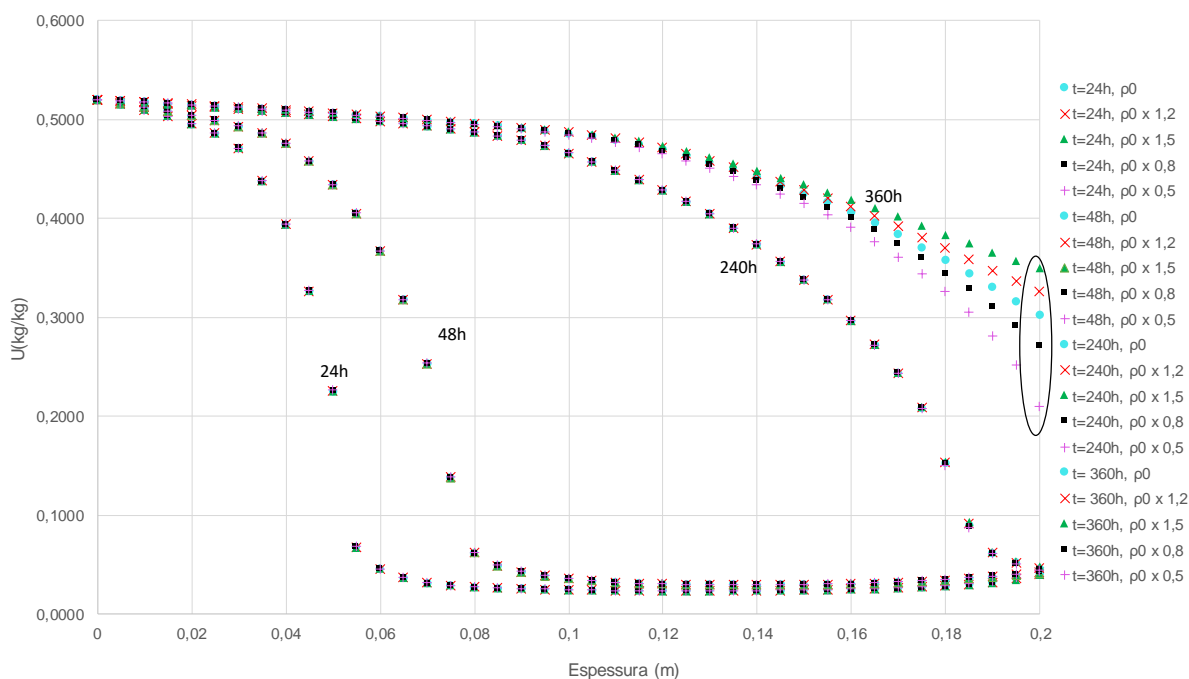


Figura 29 – Variação dos perfis do teor de humidade em embebição face à variação da massa volúmica seca do betão celular, considerando uma  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=85\%$  (simulações: 31-BCp, 32-BCp, 33-BCp, 34-BCp e 35-BCp).

A análise dos resultados obtidos a partir das quatro figuras anteriores permite concluir que:

- Quanto menor é a humidade relativa da ambiência interior, maior é a influência de  $\rho_0$  nos perfis do teor de humidade à superfície, com uma maior dispersão nos resultados;
- Quanto maior é a humidade relativa interior, maiores são os valores do teor de humidade registados na face interior dos elementos.

A justificação pode ser compreendida com o auxílio da Figura 30 e da equação (25) de igualdade do fluxo de humidade, imposta pelo programa, na superfície de separação material-ar. Quando o fluxo de secagem é maior ( $HR_{int}$  baixas), o fluxo transportado através do material, que cresce com  $\rho_0$  de acordo com o primeiro membro da equação (25), passa a ter um maior significado, pelo que variações na massa volúmica seca provocam uma maior influência nos resultados. Por outro lado, quando a  $HR_{int}$  é elevada, o fluxo de secagem é menor, e os teores de humidade no elemento são maiores. A Figura 30 pretende ilustrar esse fenómeno, comparando-o a um funil com água. De facto, quando na fronteira os fluxos em jogo são baixos e a frente húmida continua a chegar, os níveis da água no funil aumentam.

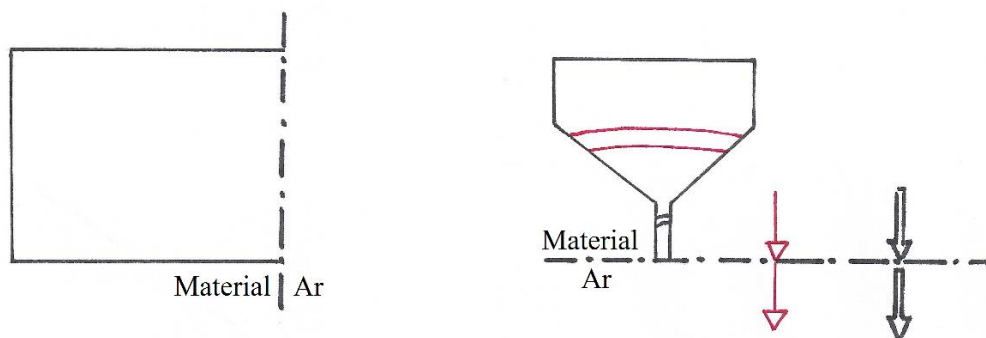


Figura 30 – Comparação dos fenómenos na superfície interior dos elementos ao comportamento de um funil com água.

$$\rho_0 \cdot D_w \left( \frac{\partial U}{\partial x} + D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=sup} = \beta [PS_{sup} \cdot HR_{sup} - PS_{amb} \cdot HR_{amb}] \quad (25)$$

A partir dos perfis do teor de humidade em diferentes instantes de tempo, obtidos diretamente do TRHUMIDADE, elaboraram-se outros gráficos para sintetizar os resultados, que seguidamente se apresentam.

Na Figura 31 calculou-se para o barro vermelho, em diferentes instantes de tempo, a quantidade de água contida no material, em kg. Essa informação foi obtida a partir do cálculo do integral de cada perfil do teor de humidade num determinado instante, multiplicando pela respetiva massa volúmica seca. Os resultados obtidos demonstram que  $\rho_0$  teria uma grande influência se existissem na realidade materiais teóricos onde todas as propriedades se mantêm constantes e apenas varia a massa volúmica seca.

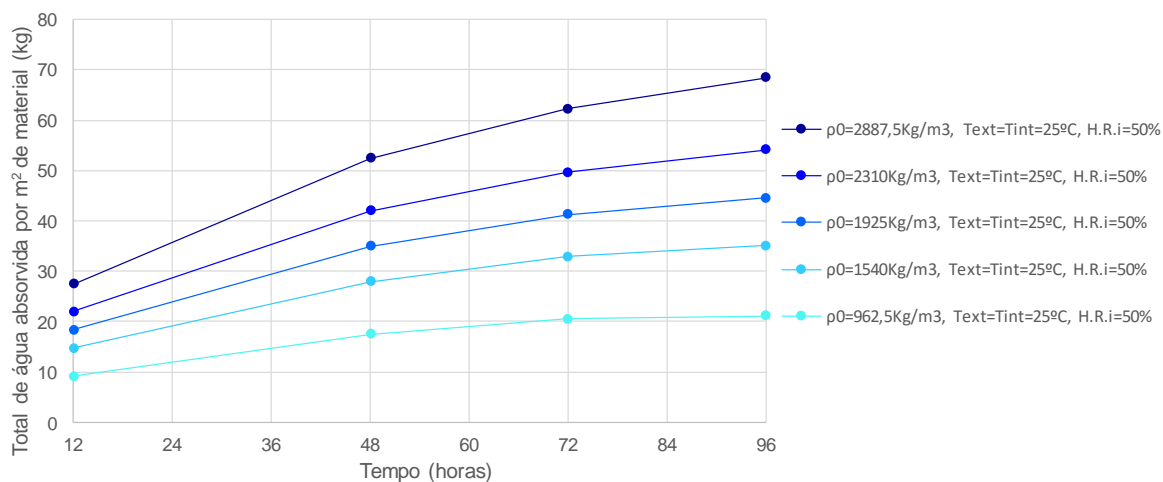


Figura 31 – Comparação do total de água absorvida no barro vermelho, em função da massa volúmica seca (simulações 6-BVp, 7-BVp, 8-BVp, 9-BVp e 10-BVp).

No caso do betão celular, sintetizou-se na Figura 32 a dispersão dos teores de humidade na face interior do material em função da  $HR_{int}$  e da massa volúmica seca ao fim de 360 h de embebição, onde se comprova que quanto maior é a humidade relativa, menor é a dispersão nos teores de humidade para as diferentes massas volúmicas. Contudo, para  $HR_{int}$  iguais ou inferiores a 65%, como a frente húmida não atinge a face interior do betão (domínio higroscópico), volta-se a uma situação semelhante à apresentada na Figura 25, não se registando qualquer variação dos teores de humidade.



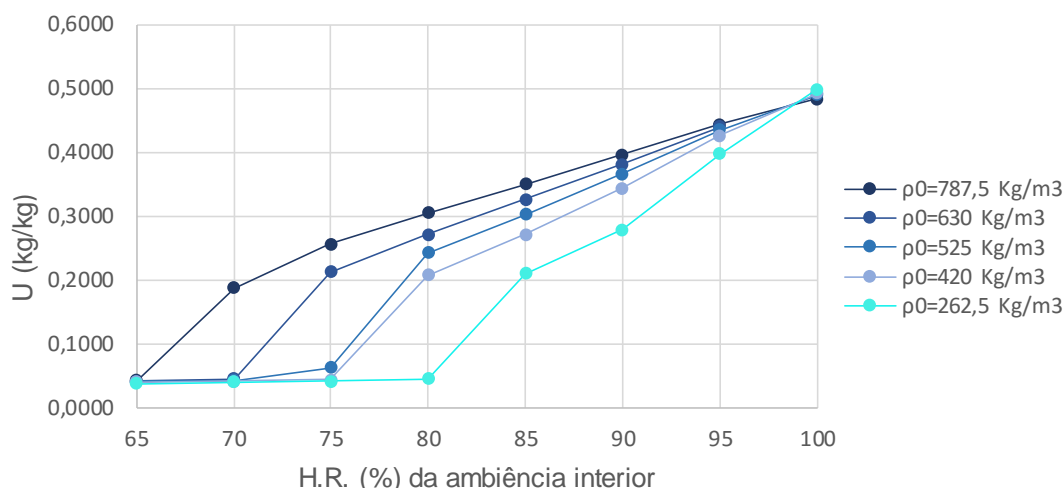


Figura 32 – Teor de humidade na superfície interior de um elemento de betão celular, em função da HR da ambiência interior e da massa volúmica seca, ao fim de 360h de embebição (simulações 11-BCp a 50-BCp).

A evolução do teor de humidade com o decorrer do tempo num ponto específico do material em estudo, também se pode obter através dos perfis do teor de humidade em cada instante. Na Figura 33 apresenta-se um exemplo desse tipo de análise efetuado para o betão celular a 20cm de distância do contacto com a água líquida (face interior).

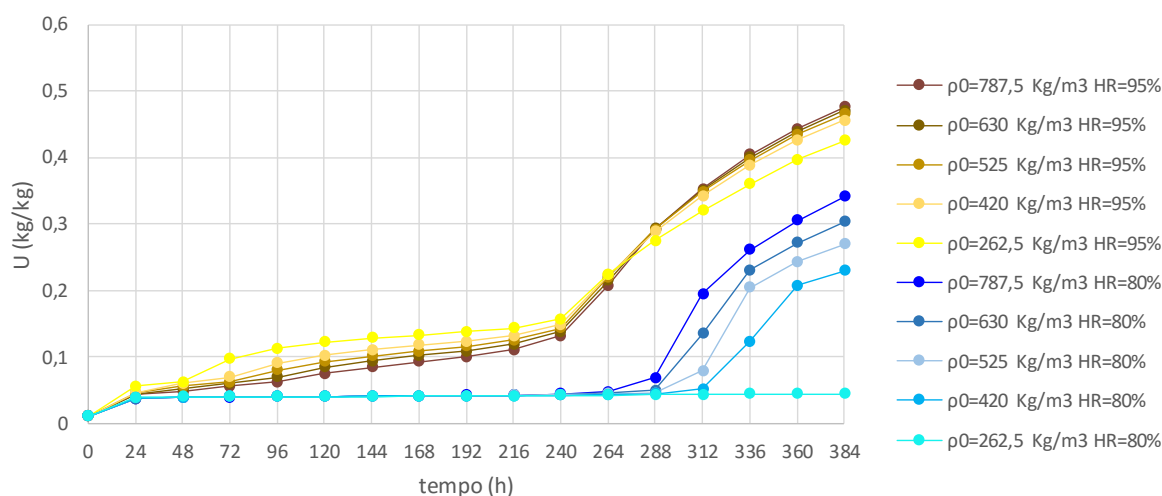


Figura 33 – Evolução do teor de humidade ao longo do tempo na face interior do betão, em função da massa volúmica seca e da HR da ambiência interior (simulações: 26-BCp a 30-BCp; 41-BCp a 45-BCp) .

Da figura anterior é possível retirar algumas conclusões interessantes. É visível que  $HR_{int}$  mais elevadas implicam maiores teores de humidade na face interior do betão, conseguindo-se ainda conhecer o intervalo de tempo que a frente húmida demora a penetrar 20cm no material. Quando a  $HR_{int}$  é de 80%, só ao fim de aproximadamente 260h é que a frente húmida atinge a superfície interior. Para uma  $HR_{int}$  de 95% há uma fase inicial que corresponde ao teor de humidade em domínio higroscópico, até cerca das 240h, e só a partir daí há registos de teores de humidade característicos da chegada da frente húmida

(domínio capilar). No caso da humidade relativa da ambiência de 80%, antes da chegada da frente húmida, há também um equilíbrio do teor de humidade em domínio higroscópico. Contudo como a curva higroscópica apenas apresenta um elevado crescimento para teores de humidade próximos do de saturação, quando a  $HR_{int}$  é de 80% o equilíbrio com o ambiente é mais rapidamente atingido, estabilizando para valores do teor de humidade mais baixos.

Em síntese, para a massa volúmica seca é possível concluir que:

- Esta propriedade tem influência nas proximidades da superfície de separação material-ar, nas situações em que a frente húmida atinge a face interior dos elementos, quando o fenómeno de secagem é relevante;
- Se existissem materiais reais com as mesmas propriedades exceto  $\rho_0$ , este parâmetro teria uma grande influência na quantidade de água absorvida durante o processo de embebição (Figura 31).

#### 4.3.1.2. CALOR ESPECÍFICO DO MATERIAL SECO

A gama de valores adotada no estudo de sensibilidade do calor específico do material seco é apresentada na Tabela 24, sendo obtida a partir do calor específico característico do barro vermelho e do betão celular, **920 J/(kg.K)** e **1050 J/(kg.K)**, respetivamente. A multiplicação e divisão de  $C_0$  por 10, em cada um dos materiais, conduz a valores desta propriedade que se afastam significativamente dos encontrados na literatura. De facto, a pesquisa elaborada no capítulo 3, demonstrou que na maioria dos materiais porosos  $C_0=1000\text{J}/(\text{kg.K})$ . Assim, salvaguarda-se que apenas se considerou tais valores com o intuito de confirmar, que nas condições estudadas,  $C_0$  não influenciava os resultados.

Tabela 24 – Gama de valores adotados no estudo de sensibilidade de  $C_0$ , para cada um dos materiais

Calor específico do material seco, $C_0$ [J/(kg.K)]	• Barro vermelho	$C_0 \times 10$ : $C_0=9200 \text{ J}/(\text{kg.K})$
		$C_0 \times 2$ : $C_0=1840 \text{ J}/(\text{kg.K})$
		<b><math>C_0 = 920 \text{ J}/(\text{kg.K})</math></b>
		$C_0 / 2$ : $C_0=460 \text{ J}/(\text{kg.K})$
		$C_0 / 10$ : $C_0=92 \text{ J}/(\text{kg.K})$
	• Betão celular	$C_0 \times 10$ : $C_0=10500 \text{ J}/(\text{kg.K})$
		$C_0 \times 2$ : $C_0=2100 \text{ J}/(\text{kg.K})$
		<b><math>C_0=1050 \text{ J}/(\text{kg.K})</math></b>
		$C_0 / 2$ : $C_0=525 \text{ J}/(\text{kg.K})$
		$C_0 / 10$ : $C_0=105 \text{ J}/(\text{kg.K})$

As condições adotadas nas 25 simulações efetuadas no estudo desta propriedade apresentam-se na Tabela 25. O estudo da  $HR_{int}=80\%$ , apenas foi efetuado para o betão celular, para confirmar que a variação de  $C_0$  não alterava os resultados, mesmo quando o domínio capilar era atingido na face interior deste material.

Tabela 25 – Descrição das simulações efetuadas para o estudo de sensibilidade de  $C_0$ .

Exterior		Interior		$C_0$ [J/(kg.K)]		Ref. Material	
$HR_{ext}$	$T_{ext}$	$T_{int}$	$HR_{int}$	Barro V.	Betão C.	Barro V.	Betão C.
100%	25°C	25°C	50%	9200	10500	1-BVc	1-BCc
				1840	2100	2-BVc	2-BCc
				<b>920</b>	<b>1050,0</b>	<b>3-BVc</b>	<b>3-BCc</b>
				460	525	4-BVc	4-BCc
				92	105	5-BVc	5-BCc
			80%	-	10500	-	6-BCc
				-	2100	-	7-BCc
				-	1050,0	-	8-BCc
				-	525	-	9-BCc
				-	105	-	10-BCc
	10°C	25°C	50%	9200	10500	6-BVc	11-BCc
				1840	2100	7-BVc	12-BCc
				920	1050,0	8-BVc	13-BCc
				460	525	9-BVc	14-BCc
				92	105	10-BVc	15-BCc






Das simulações realizadas apenas as representadas pelas cores  e  se encontram no corpo da dissertação, correspondendo à Figura 34 e Figura 35, respetivamente. As restantes organizam-se em anexo conforme a Tabela 26.

Tabela 26 – Organização das simulações.

Simulações		Descrição	Localização	
		Variação da $HR_{int}$	Anexo 7	
			6-BCc	
			7-BCc	
			8-BCc	
			9-BCc	
			10-BCc	
 		Gradiente de temperatura	Anexo 7	
			6-BVc	11-BCc
			7-BVc	12-BCc
			8-BVc	13-BCc
			9-BVc	14-BCc
			10-BVc	15-BCc

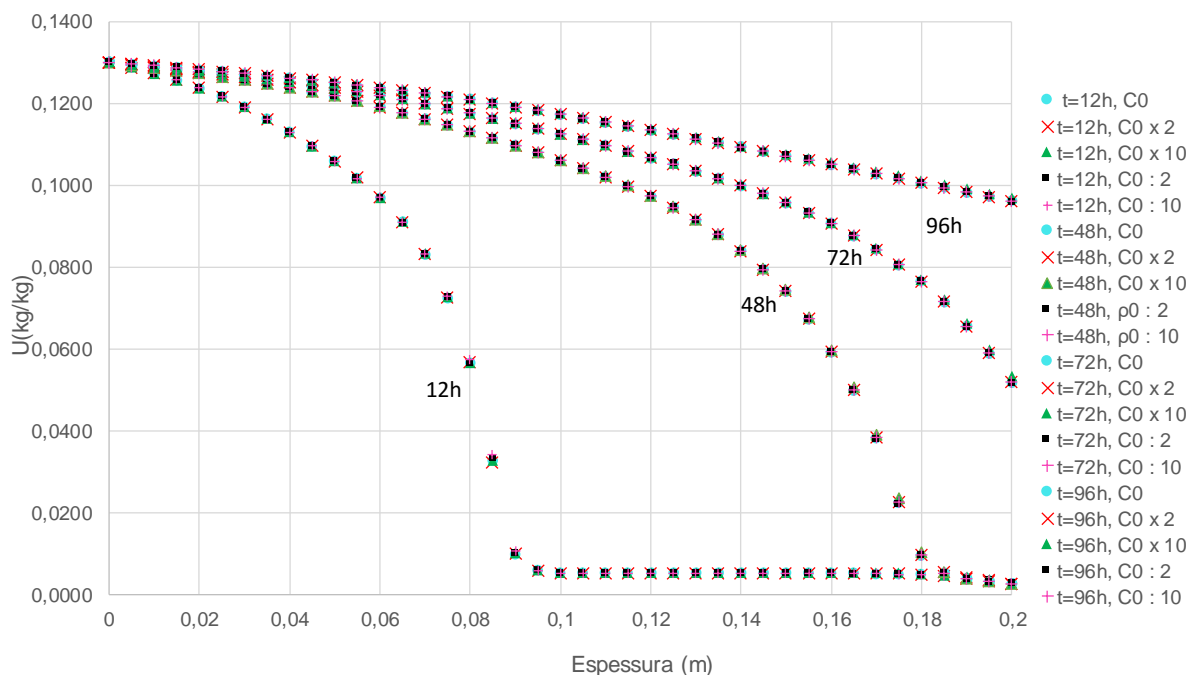


Figura 34 – Variação dos perfis do teor de umidade em embebição face à variação do calor específico seco do barro vermelho, considerando:  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 1-BVc, 2-BVc, **3-BVc**, 4-BVc e 5-BVc).

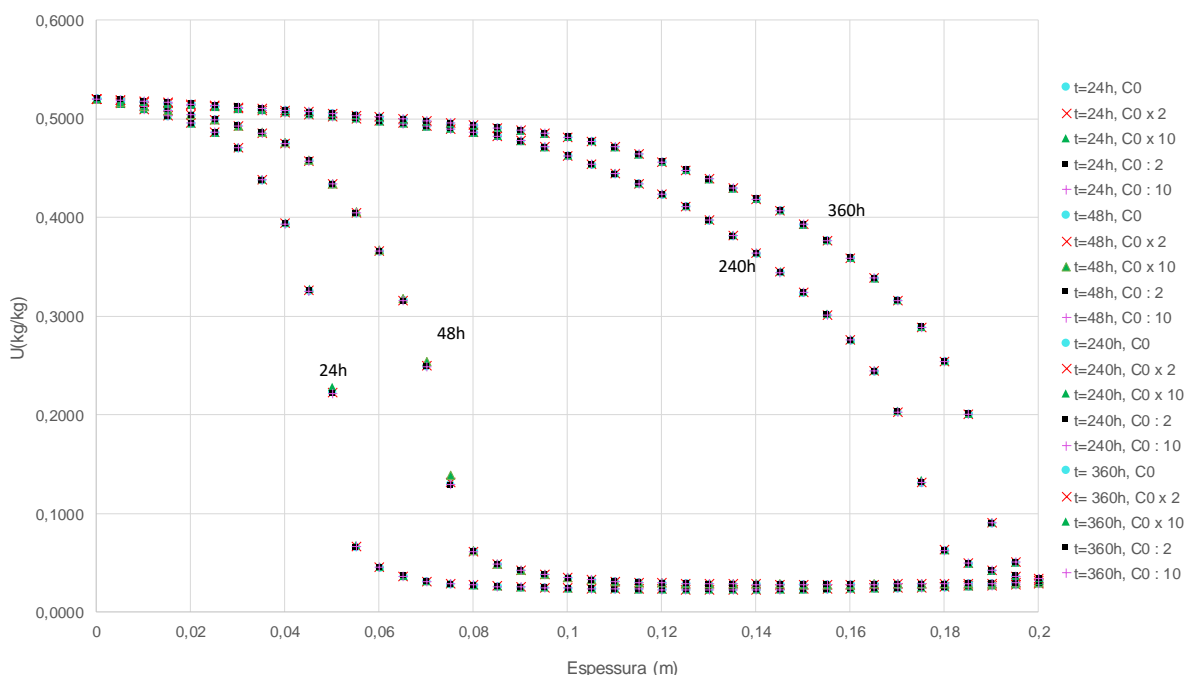


Figura 35 – Variação dos perfis do teor de umidade em embebição face à variação do calor específico seco do betão celular, considerando:  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  ( simulações: 1-BCc, 2-BCc, **3-BCc**, 4-BCc, 5-BCc).

A análise dos resultados da Figura 34 e da Figura 35, bem como das simulações apresentadas em anexo, permite concluir que:

- O calor específico do material seco não tem aparentemente qualquer influência nos perfis do teor de humidade no processo de embebição do barro vermelho e do betão celular, nem em condições isotérmicas, nem após a introdução de um gradiente de temperatura.

O calor específico só deverá condicionar os resultados para simulações realizadas em regime variável ou transitório de temperaturas, em materiais com grande massa volúmica e baixa condutibilidade térmica, o que influenciará os perfis de temperaturas e consequentemente os perfis do teor de humidade [11].

#### 4.3.1.3. POROSIDADE

A porosidade é uma propriedade utilizada para a determinação do teor de humidade máximo de um material,  $U_{\text{máx}}$  (kg/kg). No programa TRHUMIDADE, o  $U_{\text{máx}}$  é utilizado na definição do vetor VLIN, vetor que contém vários valores do teor de humidade, em função dos quais se definem as propriedades dependentes de  $U$ . Nas simulações executadas neste trabalho, não se considerou o teor de humidade máximo, isto é, o vetor VLIN do barro vermelho e do betão celular termina nos respetivos teores de humidade de saturação. Assim, para além da porosidade não constituir uma propriedade que possa ser inserida diretamente no programa, neste trabalho a introdução de teores de humidade superiores ao de saturação não foi contabilizada. Por este motivo, não se realizou um estudo da influência deste parâmetro nos perfis de embebição de materiais porosos. Contudo, não se pode desprezar a importância do conhecimento da porosidade e da porometria dos materiais, que são indispensáveis para a compreensão dos resultados experimentais face aos numéricos. No caso do barro vermelho, o histograma de distribuição dos poros obtido por *Vasco Freitas* [1], e representado esquematicamente na Figura 36 evidencia a existência de um único pico, enquanto o betão celular demonstrou apresentar dois tipos predominantes de poros: os grandes poros e os pequenos poros. Estes resultados têm influência nos perfis do teor de humidade em embebição representados na Figura 37. De facto, o barro vermelho apresenta um comportamento mais típico, com um teor de humidade de saturação próximo do máximo, devido à reduzida quantidade de poros que não comunicam entre si. Por outro lado, no betão celular o valor de  $U_{\text{máx}}$  é significativamente maior do que o teor de humidade de saturação, que por sua vez pode assumir dois valores consoante o tempo de contacto com a água líquida. Um valor menor,  $U_{\text{sat1}}$  correspondente ao preenchimento dos pequenos poros, e um valor maior,  $U_{\text{sat2}}$ , que ocorre para um tempo de embebição superior e corresponde ao preenchimento dos grandes poros. Apesar do programa só permitir a introdução de um valor para o teor de humidade de saturação, a compreensão da estrutura porosa dos materiais pode ser muito importante no auxílio da interpretação dos resultados.

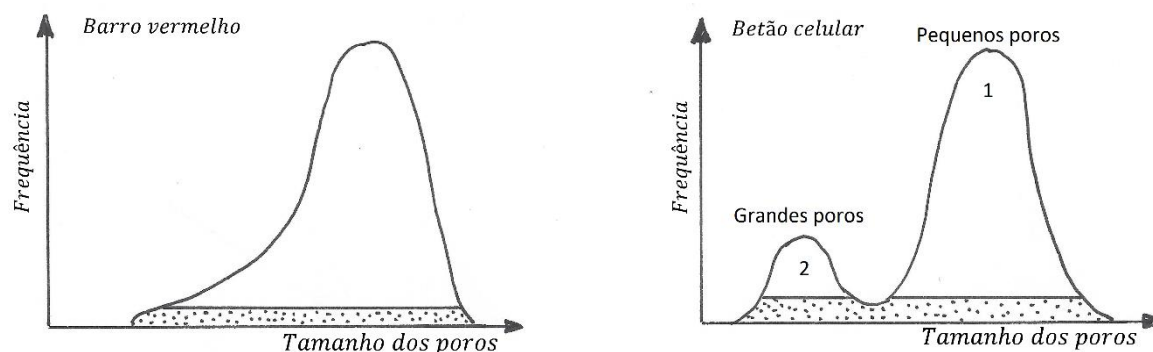


Figura 36 – Distribuição dos poros no barro vermelho e no betão celular.

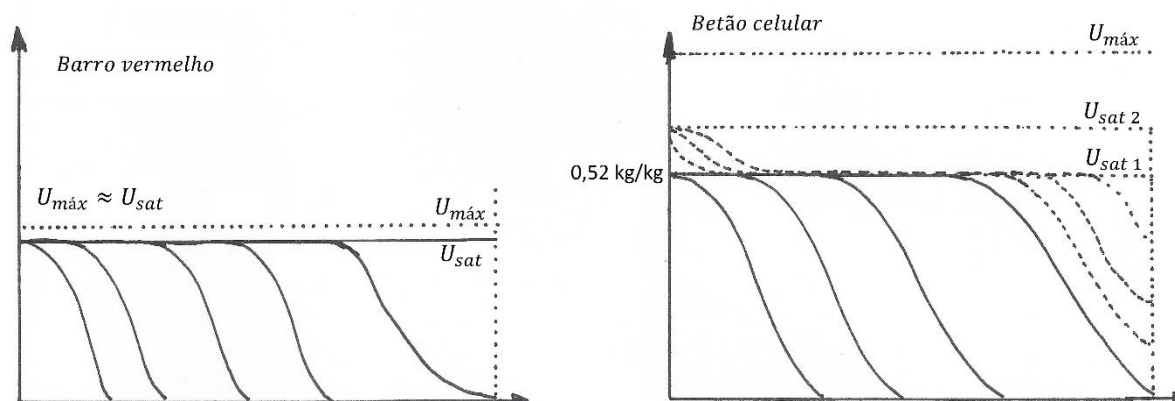


Figura 37 –Representação esquemática dos perfis do teor de humidade em embebição, evidenciando as duas faces de embebição no betão celular.

#### 4.3.1.4. CURVA HIGROSCÓPICA

Um dos parâmetros necessários à execução do programa TRHUMIDADE é a introdução da curva higroscópica do material em estudo. A variação da higroscopicidade dos materiais, mantendo constantes as suas restantes propriedades, implicou cuidados adicionais. De facto, a curva higroscópica de referência não pode ser multiplicada por valores que conduzam a um novo teor de humidade crítico,  $U_{cr}$  (kg/kg), que ultrapasse o teor de humidade de saturação,  $U_{sat}$  (kg/kg), característico do material. Por este motivo, como o barro vermelho é menos higroscópico do que o betão celular, os valores pelos quais se pode multiplicar a curva de referência do barro vermelho são superiores (para que a curva em estudo tenha coerência). Na Tabela 27 e na Figura 38 e Figura 39 encontram-se as curvas higroscópicas utilizadas na análise de sensibilidade e a respetiva explicação gráfica da curva higroscópica máxima para os dois materiais.

Tabela 27 – Curvas higroscópicas adotadas na análise de sensibilidade de cada um dos materiais.

Curva higroscópica	• Barro vermelho	Curva higroscópica x 14
		Curva higroscópica x 10
		Curva higroscópica x 3
		Curva higroscópica x 2
		<b>Curva higroscópica inicial</b>
		Curva higroscópica / 2
		Curva higroscópica / 3
	• Betão celular	Curva higroscópica x 1,8
		Curva higroscópica x 1,6
		Curva higroscópica x 1,3
		Curva higroscópica x 1,2
		<b>Curva higroscópica inicial</b>
		Curva higroscópica / 2
		Curva higroscópica / 3
		Curva higroscópica / 5
		Curva higroscópica / 10

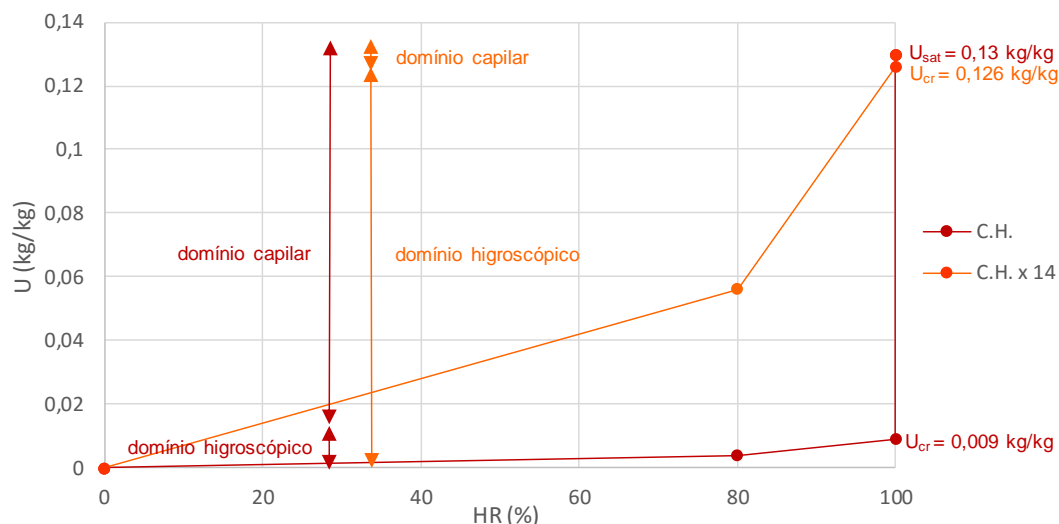


Figura 38 – Curva higroscópica de referência (vermelho) e curva higroscópica máxima (laranja) para o barro vermelho.

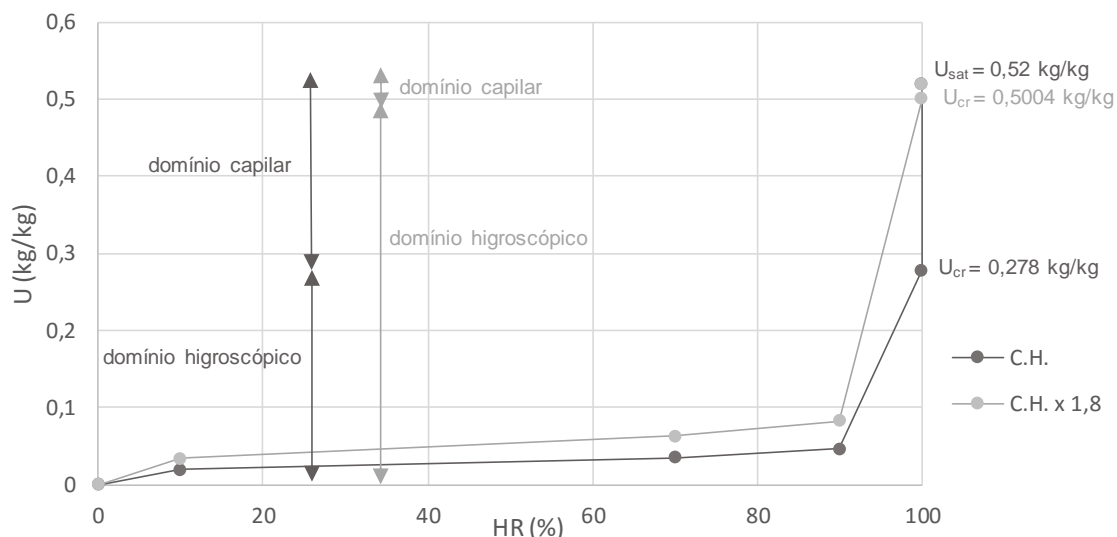


Figura 39 – Curva higroscópica de referência (cinzento escuro) e curva higroscópica máxima (cinzento claro) para o betão celular.

A influência da curva higroscópica nos resultados foi testada em 16 simulações, elaboradas nas condições apresentadas na Tabela 28.

Tabela 28 – Descrição das simulações efetuadas na análise de sensibilidade da curva higroscópica.

Exterior		Interior		Curva higroscópica		Ref. Material	
HR <sub>ext</sub>	T <sub>ext</sub>	T <sub>int</sub>	HR <sub>int</sub>	Barro V.	Betão C.	Barro V.	Betão C.
100%	25°C	25°C	50%	C. H. x 14	C. H. x 1,8	1-BVch	1-BCch
				C. H. x 10	C. H. x 1,6	2-BVch	2-BCch
				C. H. x 3	C. H. x 1,3	3-BVch	3-BCch
				C. H. x 2	C. H. x 1,2	4-BVch	4-BCch
				<b>C. H.</b>	<b>C. H.</b>	<b>5-BVch</b>	<b>5-BCch</b>
				C. H. / 2	C. H. / 2	6-BVch	6-BCch
				C. H. / 3	C. H. / 3	7-BVch	7-BCch
				-	C. H. / 5	-	8-BCch
				-	C. H. / 10	-	9-BCch

Das simulações efetuadas, apenas alguns resultados são apresentados no corpo da dissertação, conforme se sistematiza na Tabela 29.

Tabela 29 – Organização das simulações.

Simulações		Descrição	Localização	
<div></div>	<div></div>	Aumento da higroscopicidade	Corpo da dissertação	
			Figura 40	Figura 41
	<div></div>	Diminuição da higroscopicidade	Corpo da dissertação	
			Figura 42	
<div></div>			Anexo 8	
			6-BVch	7-BVch

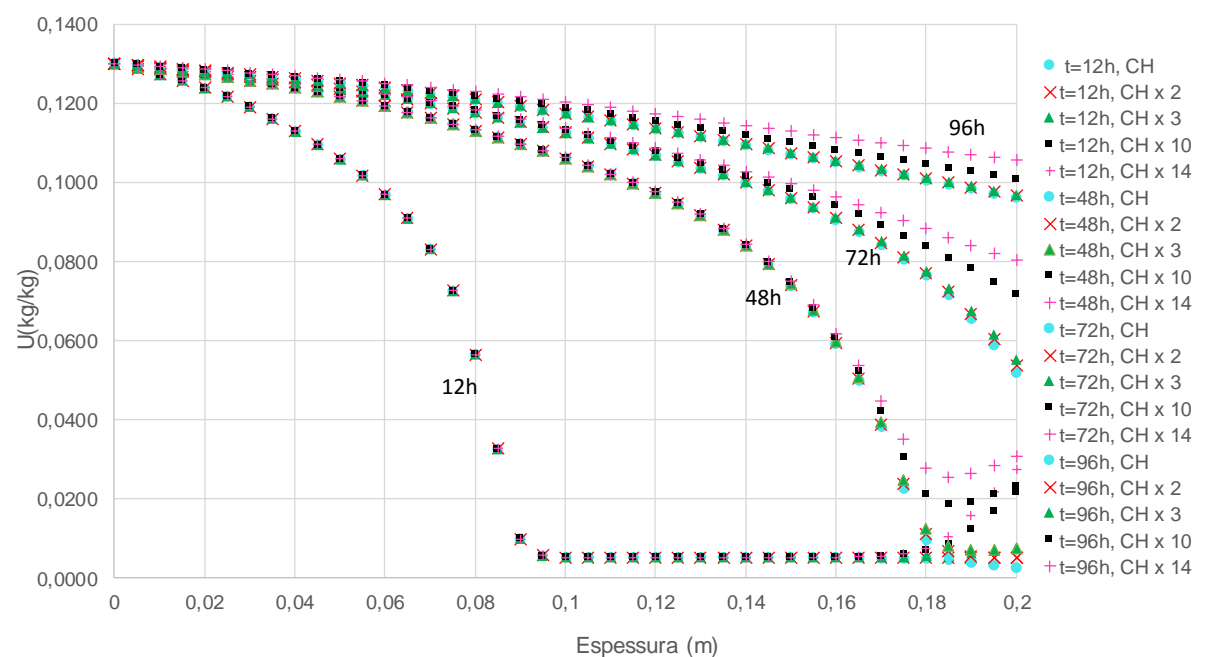


Figura 40 – Variação dos perfis do teor de umidade em embebição face ao aumento da higroscopicidade do barro vermelho, considerando uma  $T_{ext}=25^{\circ}C$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}C$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 1-BVch, 2-BVch, 3-BVch, 4-BVch e **5-BVch**).



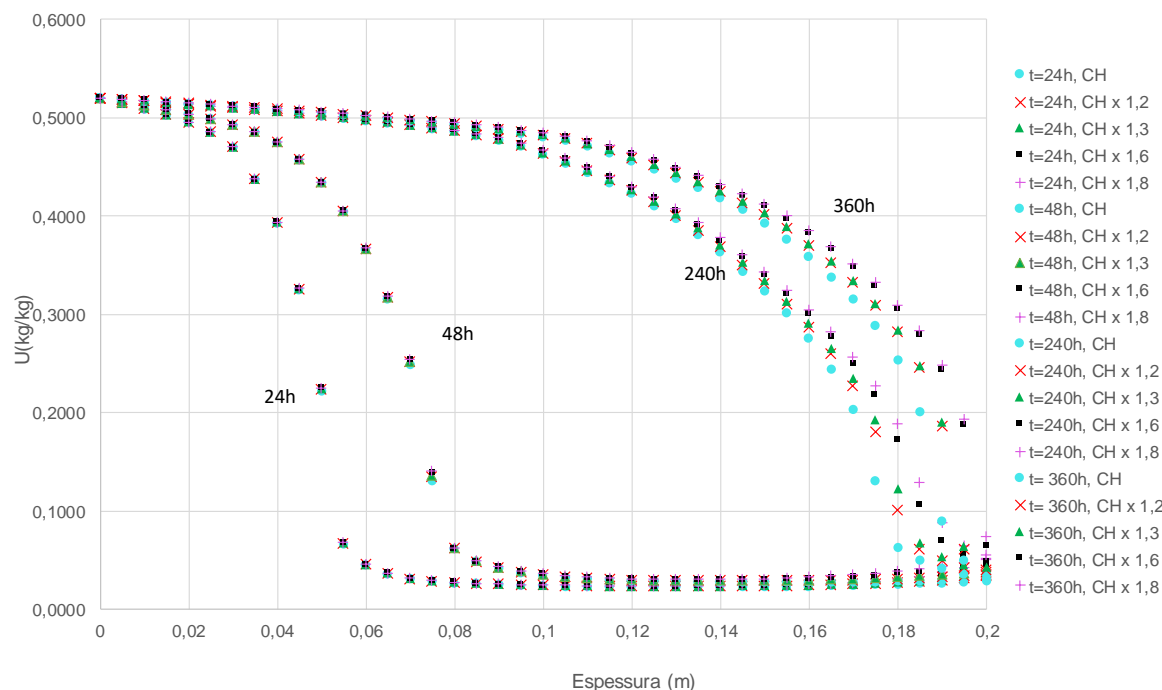


Figura 41 – Variação dos perfis do teor de umidade em embebição face ao aumento da higroscopicidade do betão celular, considerando uma  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 1-BCch, 2-BCch, 3-BCch, 4-BCch e **5-BCch**).

A análise dos perfis do teor de umidade apresentados na Figura 40 e na Figura 41, revelam que:

- O aumento da higroscopicidade dos materiais, provoca uma maior adsorção de moléculas de água nas proximidades da superfície interior dos elementos, de modo a que o equilíbrio com a ambiência interior seja atingido. De facto, como o teor de umidade higroscópico correspondente a uma humidade relativa de 50% é mais elevado, resultante da translação da curva higroscópica, os teores de umidade na face interior dos materiais tendem para um valor superior. Este fenómeno, é visível no barro vermelho para as primeiras horas de simulação (12h e 48h), onde o domínio capilar ainda não foi atingido na face interior. No caso do betão celular, também se regista um aumento dos teores de umidade higroscópico na face interior, cada vez que se aplica um fator majorativo à curva de referência do material.
- Para períodos de embebição mais elevados, o aumento da higroscopicidade dos materiais, traduz-se num maior avanço da frente húmida, em zonas próximas da superfície interior dos elementos. Este fenómeno, é possivelmente consequência da maior adsorção de moléculas de água registada no domínio higroscópico, que conduz a um aumento da adsorção plurimolecular e da condensação capilar. Assim, quando a frente húmida atinge essa zona, a estrutura porosa está como que “lubrificada”, conduzindo a perfis de embebição mais rápidos e teores de umidade mais elevados, quanto maior é o fator majorativo que se aplica à curva higroscópica de referência. Esta situação é mais notória no barro vermelho, ao fim de 72 e 96 horas de embebição.

Na Figura 42, apresenta-se para as 24h e 360h do processo de embebição, o efeito da diminuição da higroscopicidade no betão celular. A análise semelhante realizada para o barro vermelho encontra-se no anexo 8, onde os resultados evidenciam aparentemente que a aplicação de um fator minorativo à curva de referência do barro vermelho não influencia os perfis do teor de umidade obtidos. Este resultado

pode advir do facto de o barro vermelho ser um material muito pouco higroscópico, ao contrário do betão celular.

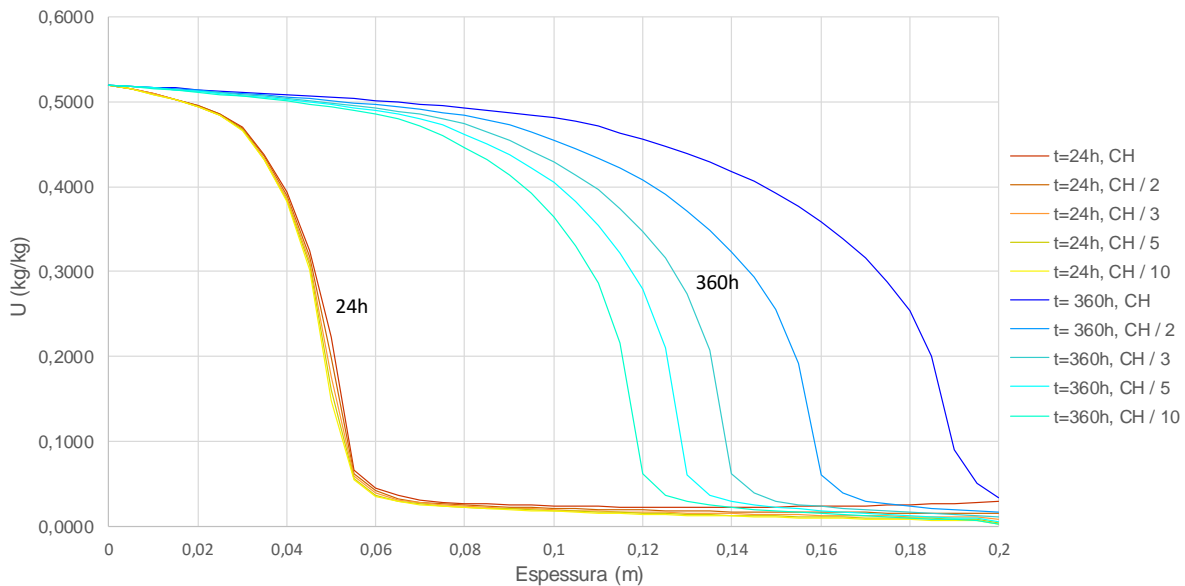


Figura 42 – Variação dos perfis do teor de humidade em embebição face à diminuição da higroscopicidade do betão celular, considerando uma  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 5-BCch, 6-BCch, 7-BCch, 8-BCch e 9-BCch)

A análise da Figura 42, evidencia que a diminuição da higroscopicidade no betão celular tem influência significativa nos perfis do teor de humidade, principalmente quando submetido a longos períodos de embebição. De facto, ao aplicar um fator minorativo à curva higroscópica de referência, o elemento não vai adsorver tantas moléculas de água do ambiente interior para atingir o equilíbrio. Assim, há uma redução do fenómeno de adsorção plurimolecular e condensação capilar, que se traduz numa maior resistência à progressão da frente húmida, como é principalmente visível ao fim de 360h de embebição. Ao fim de 24h, o efeito da higroscopicidade que advém das trocas da superfície interior com o ar, não é tão notório, possivelmente porque os perfis ainda estão numa zona muito interior do material.

Na Figura 43, ilustra-se o efeito da higroscopicidade no provete de um material, onde se representa o que se entende por ser a zona onde tal efeito é mais evidente, apesar de aumentar com o decorrer do tempo.

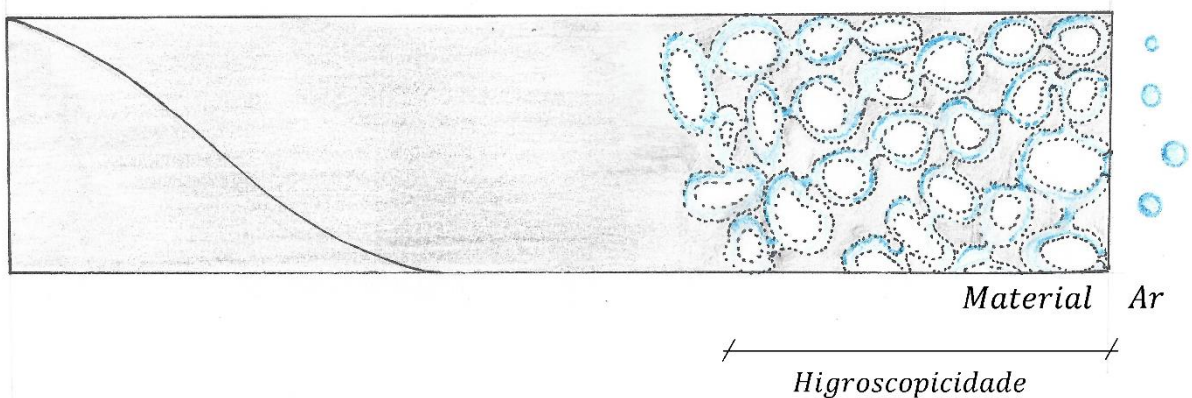


Figura 43 – Zona da estrutura porosa "lubrificada" devido ao fenómeno da higroscopicidade.

#### 4.3.1.5. SUCÇÃO CAPILAR

A curva de sucção capilar em função do teor de humidade é fundamental para traduzir a condição de continuidade hidráulica entre as várias camadas de um elemento num processo de transferência de humidade. Neste trabalho, apenas se simulou o processo de embebição em elementos monolíticos, não se tendo estudado o problema da interface entre materiais. Assim, as simulações efetuadas tiveram como único objetivo comprovar a ausência de influência deste parâmetro nos perfis do teor de humidade obtidos, validando o trabalho de reescrita do programa TRHUMIDADE. A gama de valores adotados nas simulações é a que consta na Tabela 30.



Tabela 30 – Gama de valores adotados na análise de sensibilidade da sucção capilar.

Sucção capilar, S [Pa]	• Barro vermelho	S x 10
		<b>S</b>
		S / 10
	• Betão celular	S x 10
		<b>S</b>
		S / 10

As condições consideradas nas 6 simulações realizadas apresentam-se na Tabela 31.

Tabela 31 – Descrição das simulações efetuadas para o estudo de sensibilidade da sucção capilar

Exterior		Interior		Sucção capilar, S [Pa]		Ref. Material	
HR <sub>ext</sub>	T <sub>ext</sub>	T <sub>int</sub>	HR <sub>int</sub>	Barro V.	Betão C.	Barro V.	Betão C.
100%	25°C	25°C	50%	S x 10	S x 10	1-BVs	1-BCs
				<b>S</b>	<b>S</b>	2-BVs	2-BCs
				S / 10	S / 10	3-BVs	3-BCs

A Figura 44 e a Figura 45, correspondem ao conjunto de simulações assinalado pelas cores  e , para o barro vermelho e para o betão celular, respetivamente. Os resultados obtidos confirmam o esperado, isto é, a sucção capilar não demonstra ter influência nos resultados para as condições em estudo.

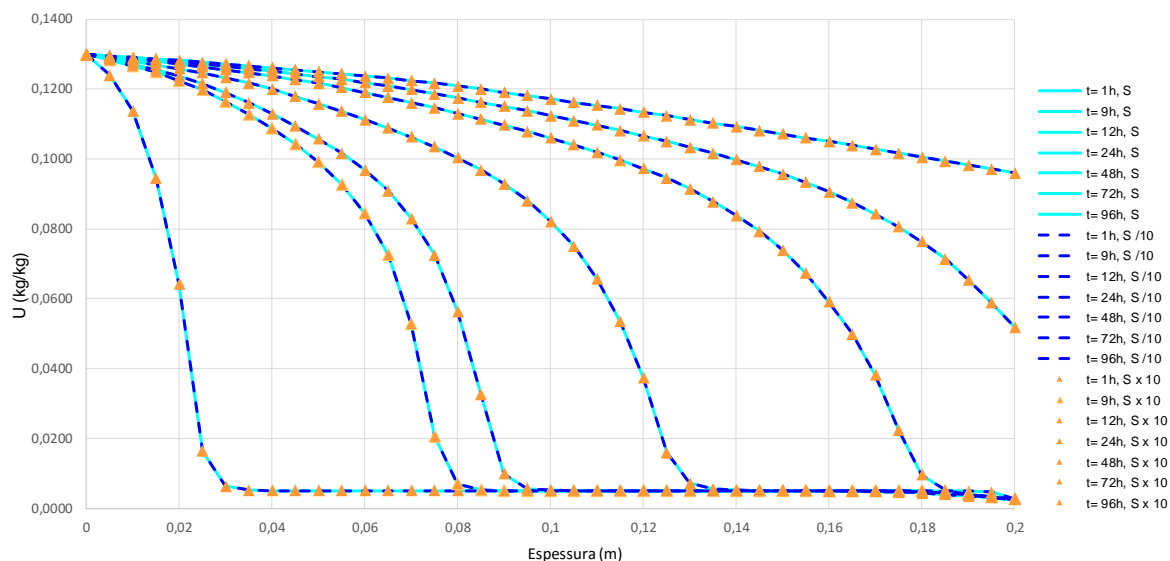


Figura 44 – Variação dos perfis do teor de humidade me embebição face à variação da sucção capilar do barro vermelho, considerando:  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 1-BVs, 2-BVs e 3-BVs).

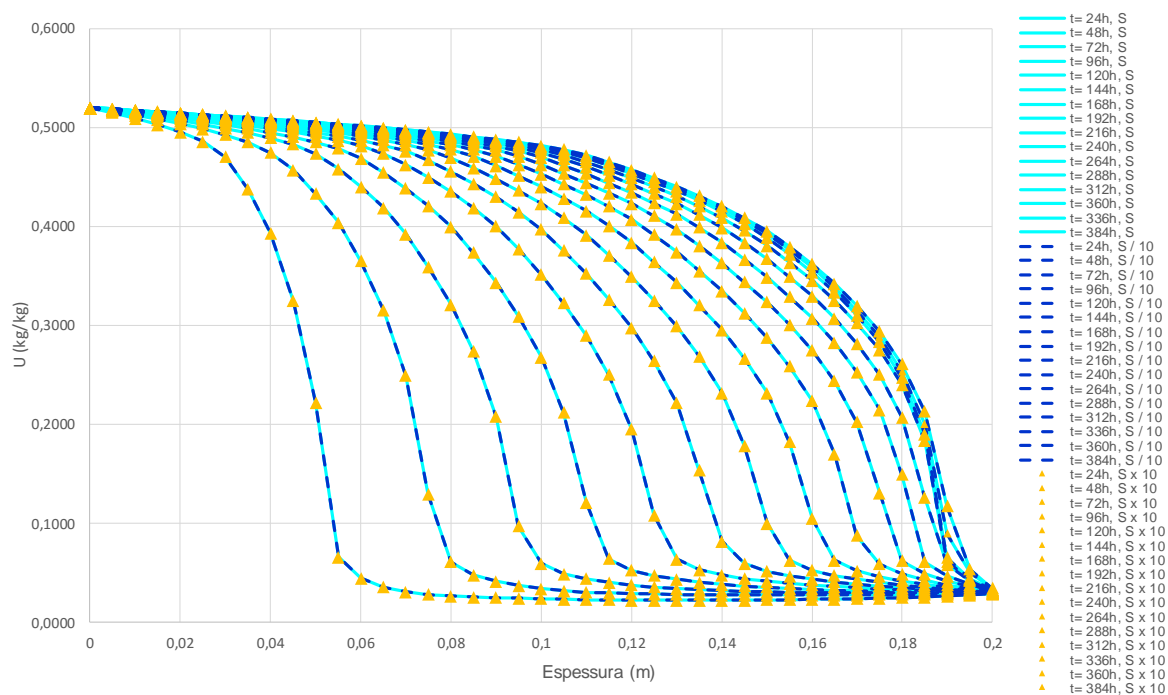


Figura 45 – Variação dos perfis do teor de humidade em embebição face à variação da sucção capilar do betão celular, considerando:  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 1-BCs, 2-BCs e 3-BCs).

#### 4.3.1.6. DIFUSIVIDADE HÍGRICA

O conhecimento da curva que expressa a variação da difusividade hídrica,  $D_w$  ( $m^2/s$ ), em função do teor de humidade para um determinado material é fundamental para o estudo da transferência conjunta de calor e humidade. No caso do barro vermelho e do betão celular, os valores de  $D_w$  crescem, a partir de um determinado teor de humidade, à medida que este aumenta. A ordem de grandeza desta propriedade nos dois materiais em estudo, varia entre  $10^{-9}$  ( $m^2/s$ ) e  $10^{-7}$  ( $m^2/s$ ), consoante o teor de humidade. Apesar da ordem de grandeza da difusividade hídrica possibilitar a realização da análise de sensibilidade a partir da aplicação de fatores majorativos/minorativos, à curva de referência, iguais a 10, 100, 1000, etc., sem conduzir a valores irrealistas, a noção da importância deste parâmetro na transferência de humidade, levou a que neste trabalho se procurasse compreender a sua influência mesmo adotando uma pequena gama de variação. Na Tabela 32, apresenta-se para o barro vermelho e para o betão celular, a gama de variação das curvas de  $D_w$  (U) adotadas na análise de sensibilidade. O aumento da difusividade hídrica a partir de um determinado valor conduziu a alguns problemas de instabilidade no programa TRHUMIDADE. No caso do barro vermelho esses problemas são mais evidentes, tendo um pequeno aumento de  $D_w$  originado instabilidade nos perfis do teor de humidade, assinalados por **K.O.** No betão celular, conseguiu-se, ainda assim, analisar a grande influência que um pequeno incremento nesta propriedade implica na progressão da frente húmida, detetando-se a partir de que valores se registam inconformidades nos resultados.

Tabela 32 – Gama de valores adotados na análise de sensibilidade da difusividade hídrica.

Difusividade hídrica, $D_w$ [ $m^2/s$ ]	• Barro vermelho	$D_w \times 10$	<b>K.O.</b>
		$D_w \times 5$	<b>K.O.</b>
		$D_w \times 4$	<b>K.O.</b>
		$D_w \times 3$	<b>K.O.</b>
		$D_w \times 2$	<b>K.O.</b>
		$D_w$	-
		$D_w / 2$	<b>O.K.</b>
		$D_w / 3$	<b>O.K.</b>
		$D_w / 4$	<b>O.K.</b>
		$D_w / 5$	<b>O.K.</b>
		$D_w / 10$	<b>O.K.</b>
	• Betão celular	$D_w \times 10$	<b>K.O.</b>
		$D_w \times 7$	<b>K.O.</b>
		$D_w \times 6$	<b>O.K.</b>
		$D_w \times 5$	<b>O.K.</b>
		$D_w \times 4$	<b>O.K.</b>
		$D_w \times 3$	<b>O.K.</b>
		$D_w \times 2$	<b>O.K.</b>
		$D_w$	-
		$D_w / 2$	<b>O.K.</b>
		$D_w / 3$	<b>O.K.</b>
		$D_w / 4$	<b>O.K.</b>
		$D_w / 5$	<b>O.K.</b>
		$D_w / 10$	<b>O.K.</b>







O estudo da influência deste parâmetro implicou a realização de 24 simulações, nas condições presentes na Tabela 33. Ao contrário das propriedades até aqui estudadas, os resultados da análise de sensibilidade da variação da curva de  $D_w$  (U), são apresentados sempre em comparação com a curva de referência, característica de cada material, sem se agrupar num mesmo gráfico um vasto número de simulações.

Tabela 33 - Descrição das simulações efetuadas no estudo de sensibilidade da difusividade hídrica.

Exterior		Interior		$D_w$ [m <sup>2</sup> /s]		Ref. Material	
HR <sub>ext</sub>	T <sub>ext</sub>	T <sub>int</sub>	HR <sub>int</sub>	Barro V.	Betão C.	Barro V.	Betão C.
100%	25°C	25°C	50%	D <sub>w</sub> x 10	D <sub>w</sub> x 10	1-BVdw	1-BCdw
				-	D <sub>w</sub> x 7	-	2-BCdw
				-	D <sub>w</sub> x 6	-	3-BCdw
				D <sub>w</sub> x 5	D <sub>w</sub> x 5	2-BVdw	4-BCdw
				D <sub>w</sub> x 4	D <sub>w</sub> x 4	3-BVdw	5-BCdw
				D <sub>w</sub> x 3	D <sub>w</sub> x 3	4-BVdw	6-BCdw
				D <sub>w</sub> x 2	D <sub>w</sub> x 2	5-BVdw	7-BCdw
				<b>D<sub>w</sub></b>	<b>D<sub>w</sub></b>	<b>6-BVdw</b>	<b>8-BCdw</b>
				D <sub>w</sub> / 2	D <sub>w</sub> / 2	7-BVdw	9-BCdw
				D <sub>w</sub> / 3	D <sub>w</sub> / 3	8-BVdw	10-BCdw
				D <sub>w</sub> / 4	D <sub>w</sub> / 4	9-BVdw	11-BCdw
				D <sub>w</sub> / 5	D <sub>w</sub> / 5	10-BVdw	12-BCdw
				D <sub>w</sub> / 10	D <sub>w</sub> / 10	11-BVdw	13-BCdw

Das simulações executas, apresentam-se no corpo da dissertação apenas os resultados mais relevantes de acordo com a Tabela 34.

Tabela 34 - Organização das simulações.

Simulações		Descrição	Localização	
		Influência de $D_w$	Corpo da dissertação	
			Figura 46	Figura 47
				Figura 48
			Corpo da dissertação	
		Instabilidade no programa	Figura 49	
			Anexo 9	
			1-BVdw	2-BCdw
			2-BVdw	
			3-BVdw	
			4-BVdw	
			5-BVdw	
		Influência de $D_w$	Anexo 9	
			7-BVdw	3-BCdw
			8-BVdw	5-BCdw
			9-BVdw	6-BCdw
			10-BVdw	7-BCdw
				9-BCdw
				10-BCdw
				11-BCdw
				12-BCdw

Na Figura 46, evidencia-se a significativa influência que a aplicação de um fator minorativo igual a 10 à curva de referência de  $D_w$  (U) do barro vermelho, provoca nos perfis do teor de humidade ao longo do tempo. O retrocesso do avanço da frente húmida é tanto mais evidente, quanto maior for o tempo decorrido desde o início da embebição.

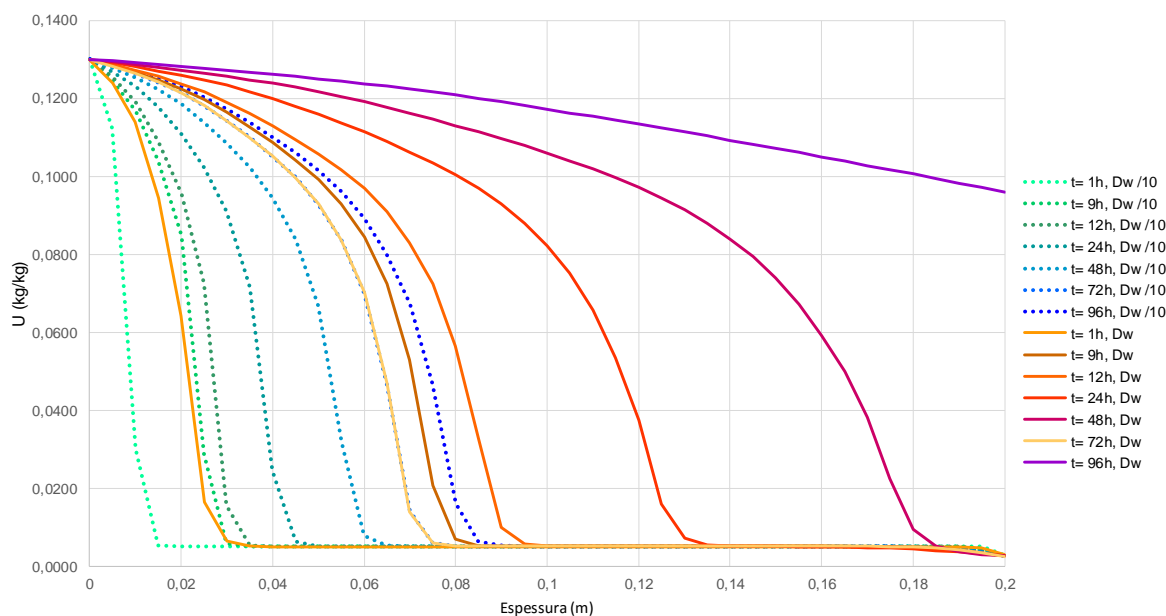


Figura 46 – Diminuição da progressão da frente húmida no barro vermelho, por efeito da redução de  $D_w$ , considerando:  $T_{ext}=25^{\circ}C$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}C$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 6-BVdw e 11-BVdw).

Na Figura 47 e na Figura 48, apresentam-se os resultados obtidos para o betão celular.

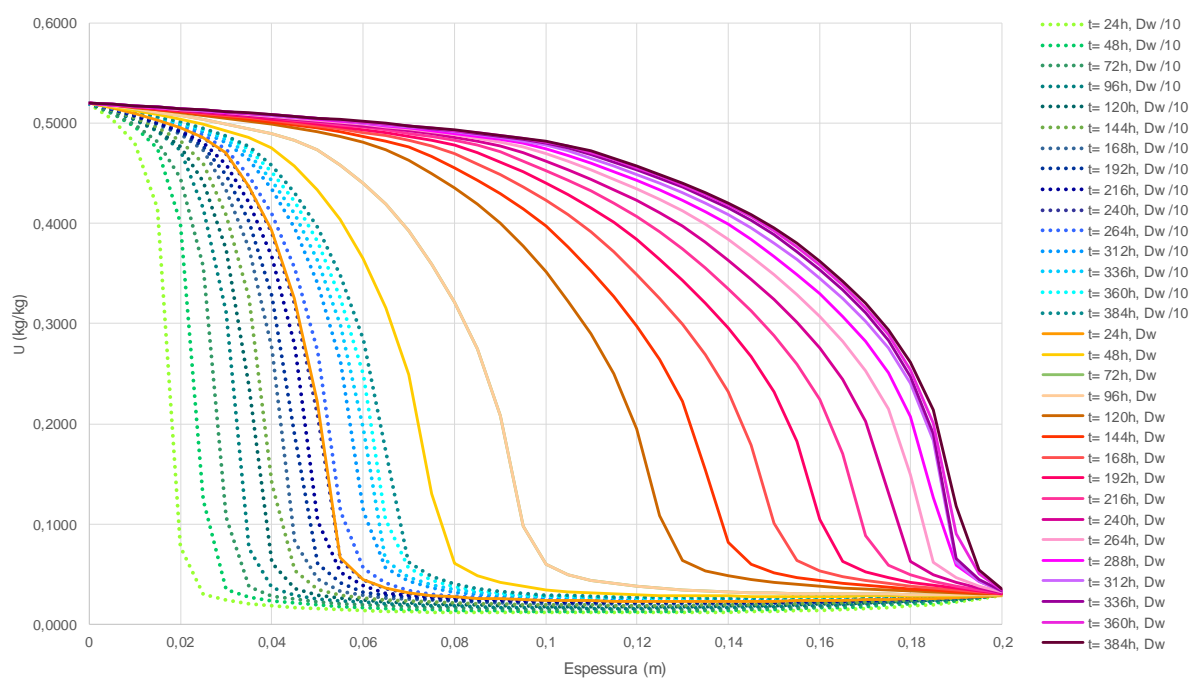


Figura 47 – Diminuição da progressão da frente húmida no betão celular, por efeito da redução de  $D_w$ , considerando:  $T_{ext}=25^{\circ}C$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}C$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 8-BCdw e 13-BCdw).



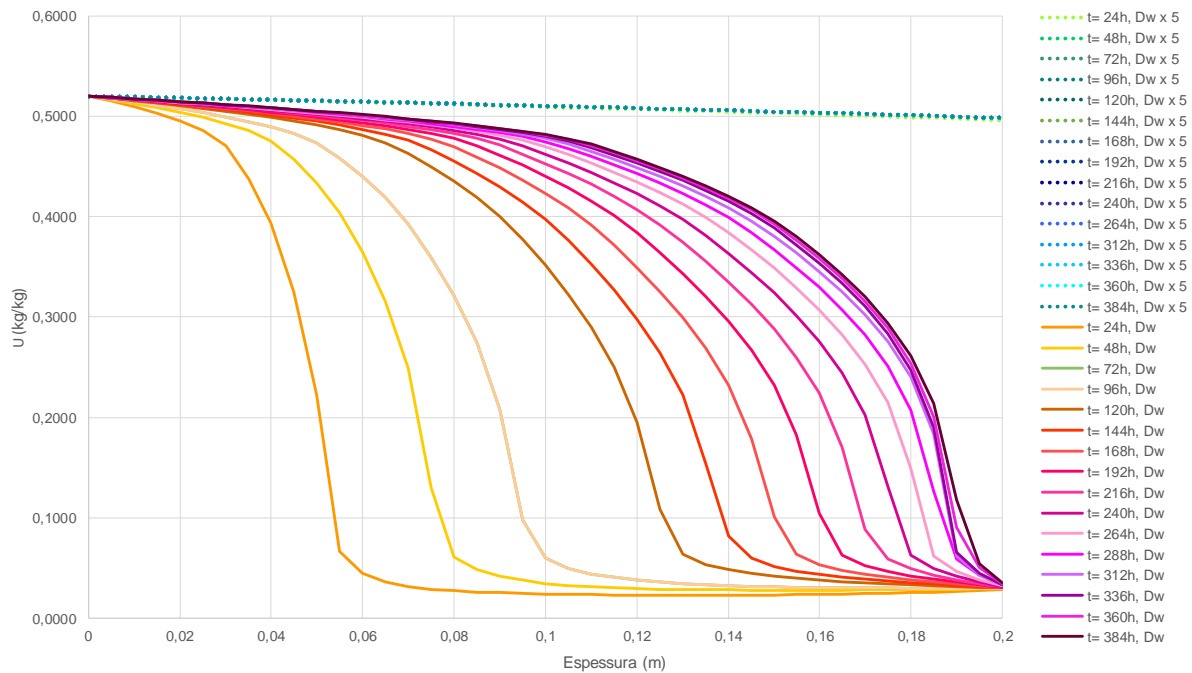


Figura 48 – Aumento da progressão da frente húmida no betão celular, por efeito do acréscimo de  $D_w$ , considerando:  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 8-BCdw e 4-BCdw).

A análise dos perfis apresentados na Figura 47 e na Figura 48 demonstra que também para o betão celular, uma pequena redução da difusividade hídrica implica um retrocesso significativo da frente húmida, enquanto um ligeiro aumento é responsável por um avanço bastante mais rápido. Na Figura 48, é visível que a aplicação de um fator majorativo de 5 à curva de referência da difusividade hídrica provoca, logo a partir das 24h, um teor de humidade em todo o provete próximo do de saturação ( $U_{sat}=0,52\text{kg/kg}$ ). No anexo 9 encontram-se outras simulações onde se evidencia o efeito do aumento da difusividade hídrica para fatores multiplicativos menores, assistindo-se a uma progressão mais gradual das posições da frente húmida desde a situação de referência até ao caso presente na Figura 48. Quanto o aumento de  $D_w$  atinge um determinado valor (x7, x10), o programa evidencia alguns problemas de instabilidade nas primeiras horas de embebição. Na Figura 49, apresenta-se um exemplo do problema detetado.



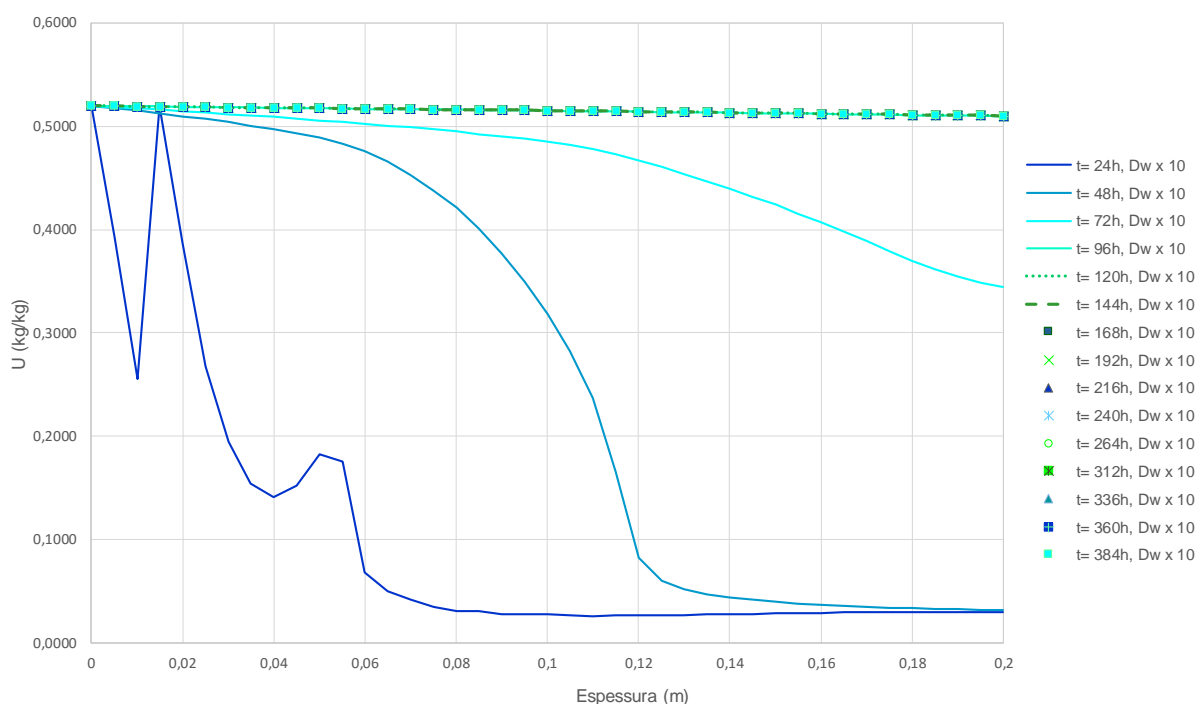


Figura 49 – Instabilidade no programa para as horas iniciais ( $T=24h$ ,  $T=48h$  e  $T=72h$ ), considerando:  $T_{ext}=25^{\circ}C$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}C$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulação: 1-BCdw).

Na Figura 50, calculou-se para o betão celular, em diferentes instantes de tempo, a quantidade de água contida no material, em kg. Essa informação foi obtida a partir do cálculo do integral de cada perfil do teor de humidade num determinado instante pelo método dos trapézios, multiplicando-se de seguida pela respetiva massa volúmica seca do betão celular. Os resultados obtidos evidenciam a grande influência de  $D_w$  no processo de embebição. Quanto maior é a difusividade hídrica maior é a “rapidez” com que a frente húmida avança no material, e consequentemente para o mesmo instante de tempo, maior é a quantidade de água absorvida pelo material. Ao diminuir o valor desta propriedade regista-se uma situação inversa.

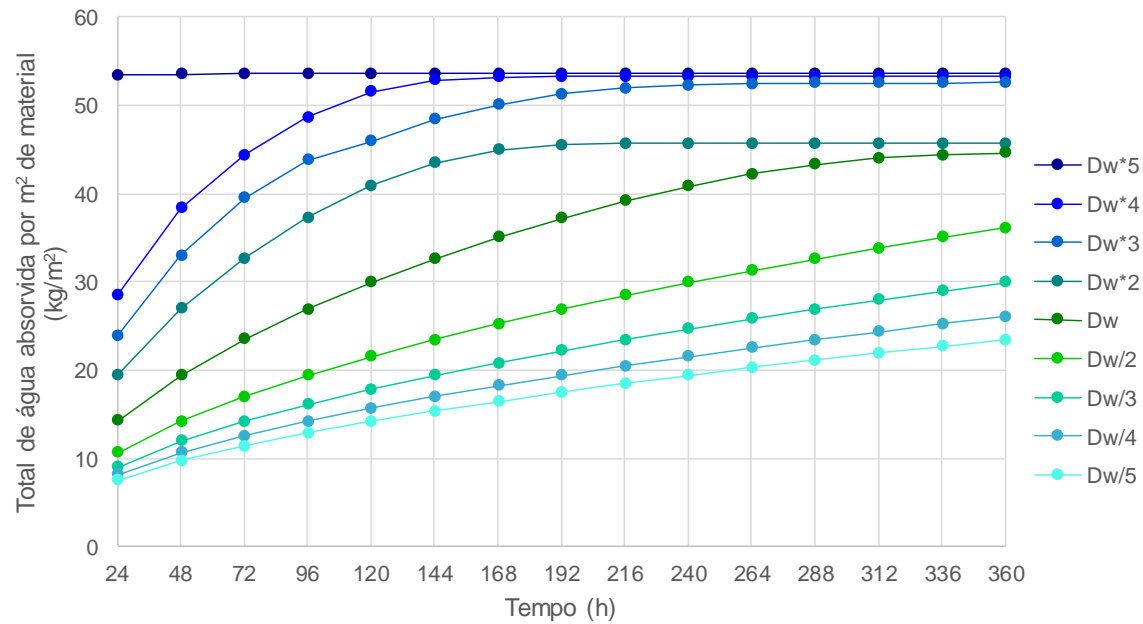


Figura 50 – Comparação do total de água absorvida no betão celular, em função da difusividade higrétrica, ao longo do tempo (utilizando resultados das simulações: 4-BCdw, 5-BCdw, 6-BCdw, 7-BCdw, 8-BCdw, 9-BCdw, 10-BCdw, 11-BCdw, 12-BCdw).

4.3.1.7. DIFUSIVIDADE HIGROTÉRMICA

O estudo da influência da difusividade higrétrica,  $D_T$  ( $m^2/s.K$ ), nos perfis do teor de humidade do barro vermelho e do betão celular, foi obtida a partir da aplicação de fatores majorativos e minorativos à curva  $D_T(U)$ , característica de cada um dos materiais. A gama de valores estudada encontra-se indicada na Tabela 35.

Tabela 35 – Gama de valores adotados na análise de sensibilidade da difusividade higrétrica.

Difusividade higrétrica, $D_T$ [ $m^2/s.K$ ]	• Barro vermelho	$D_T \times 10$
		$D_T \times 8$
		$D_T \times 4$
		$D_T \times 3$
		$D_T \times 2$
		$D_T$
		$D_T / 4$
		$D_T / 10$
	• Betão celular	$D_T \times 10$
		$D_T \times 4$
		$D_T \times 2$
		$D_T$
		$D_T / 4$
		$D_T / 10$

A ordem de grandeza dos valores de referência de  $D_T$  para o barro vermelho e para o betão celular é de  $10^{-13}(\text{m}^2/\text{s.K})$  a  $10^{-11}(\text{m}^2/\text{s.K})$ , inferior aos valores de  $D_w$ . De modo a manter a relação entre estes dois parâmetros, a análise de sensibilidade dos resultados à variação de  $D_T$  foi analisada aplicando fatores semelhantes aos utilizados no estudo de influência de  $D_w$ . Assim, será de esperar que nas simulações onde não se aplique um gradiente de temperatura significativo, o efeito da termomigração na transferência de humidade, condicionado por  $D_T$ , seja desprezável, pelo que variações nesta propriedade não deverão condicionar os resultados.









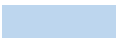


A análise de sensibilidade de  $D_T$  conduziu à execução de 33 simulações nas condições presentes na Tabela 36.

Tabela 36 - Descrição das simulações efetuadas no estudo de sensibilidade da difusividade higrotérmica.

Exterior		Interior		$D_T$ [ $\text{m}^2/\text{s.K}$ ]		Ref. Material	
$HR_{\text{ext}}$	$T_{\text{ext}}$	$T_{\text{int}}$	$HR_{\text{int}}$	Barro V.	Betão C.	Barro V.	Betão C.
100%	10°C	50°C	50%	$D_T \times 10$	$D_T \times 10$	1-BVdt	1-BCdt
				$D_T \times 4$	$D_T \times 4$	2-BVdt	2-BCdt
				$D_T \times 2$	$D_T \times 2$	3-BVdt	3-BCdt
				$D_T$	$D_T$	4-BVdt	4-BCdt
				$D_T / 4$	$D_T / 4$	5-BVdt	5-BCdt
				$D_T / 10$	$D_T / 10$	6-BVdt	6-BCdt
	25°C	25°C	50%	$D_T \times 10$	$D_T \times 10$	7-BVdt	7-BCdt
				$D_T \times 8$	-	8-BVdt	-
				$D_T \times 4$	-	9-BVdt	-
				$D_T \times 3$	-	10-BVdt	-
				$D_T \times 2$	$D_T \times 2$	11-BVdt	8-BCdt
				$D_T$	$D_T$	12-BVdt	9-BCdt
				$D_T / 10$	$D_T / 10$	13-BVdt	10-BCdt
	50°C	10°C	50%	$D_T \times 10$	$D_T \times 10$	14-BVdt	11-BCdt
				$D_T \times 4$	-	15-BVdt	-
				$D_T \times 2$	$D_T \times 2$	16-BVdt	12-BCdt
				$D_T$	$D_T$	17-BVdt	13-BCdt
				$D_T / 4$	-	18-BVdt	-
				$D_T / 10$	$D_T / 10$	19-BVdt	14-BCdt

Das simulações efetuadas selecionaram-se as mais relevantes para apresentar no corpo da dissertação, encontrando-se em anexo os restantes resultados, de acordo com a Tabela 37.

Tabela 37 – Organização das simulações.

Simulações		Descrição	Localização	
		Influência de $D_T$	Corpo da dissertação	
			Figura 51	Figura 52
		Termomigração no sentido oposto à propagação da frente húmida por capilaridade	Corpo da dissertação	
			Figura 53	Figura 54
		Termomigração no sentido da propagação da frente húmida por capilaridade	Corpo da dissertação	
			Figura 55	
		Influência de $D_T$	Anexo 10	
			8-BVdt	8-BCdt
			9-BVdt	
			10-BVdt	
			11-BVdt	
		Termomigração no sentido oposto à propagação da frente húmida por capilaridade	Anexo 10	
			1-BVdt	1-BCdt
			3-BVdt	3-BCdt
			5-BVdt	5-BCdt
		Termomigração no sentido da propagação da frente húmida por capilaridade	Anexo 10	
			14-BVdt	11-BCdt
			15-BVdt	12-BCdt
			18-BVdt	13-BCdt
				14-BCdt

Através da Figura 51 e da Figura 52 é possível observar, que a aplicação de um fator majorativo e minorativo de 10 às curvas de referência da difusividade higrótérmica do barro vermelho e do betão celular, não afeta o desenvolvimento dos perfis do teor de humidade, em condições isotérmicas.

Quando se introduz um gradiente de temperatura em regime estacionário (Figura 53 e Figura 54), através da consideração de uma  $T_{ext}=10^{\circ}\text{C}$  e de uma  $T_{int}=50^{\circ}\text{C}$ , verifica-se tanto para o barro vermelho como para o betão celular, que:

- O aumento da difusividade higrótérmica conduz a uma diminuição da progressão da frente húmida, comparativamente com a situação de referência, principalmente para longos períodos de embebição, sendo mais notória a diferença nos casos em que o domínio capilar é atingido na face interior do elemento (como acontece no barro vermelho). Uma possível justificação para estes resultados pode dever-se ao facto do aumento de  $D_T$  potenciar o efeito da termomigração, responsável pela transferência de humidade da zona mais quente para a zona mais fria. Assim, gera-se um fluxo de transferência de humidade de sentido contrário ao provocado pelo fenómeno da capilaridade, o que pode explicar o retrocesso da frente húmida quando se aumenta  $D_T$ , nestas condições de temperatura.
- Pelo contrário, a diminuição da difusividade higrótérmica resultou num ligeiro avanço da frente húmida, mais evidente para o barro vermelho ao fim de 96h de embebição. Pela mesma razão apontada anteriormente, a redução de  $D_T$  conduz à diminuição do efeito da termomigração, causando neste caso uma menor resistência ao avanço da frente húmida.

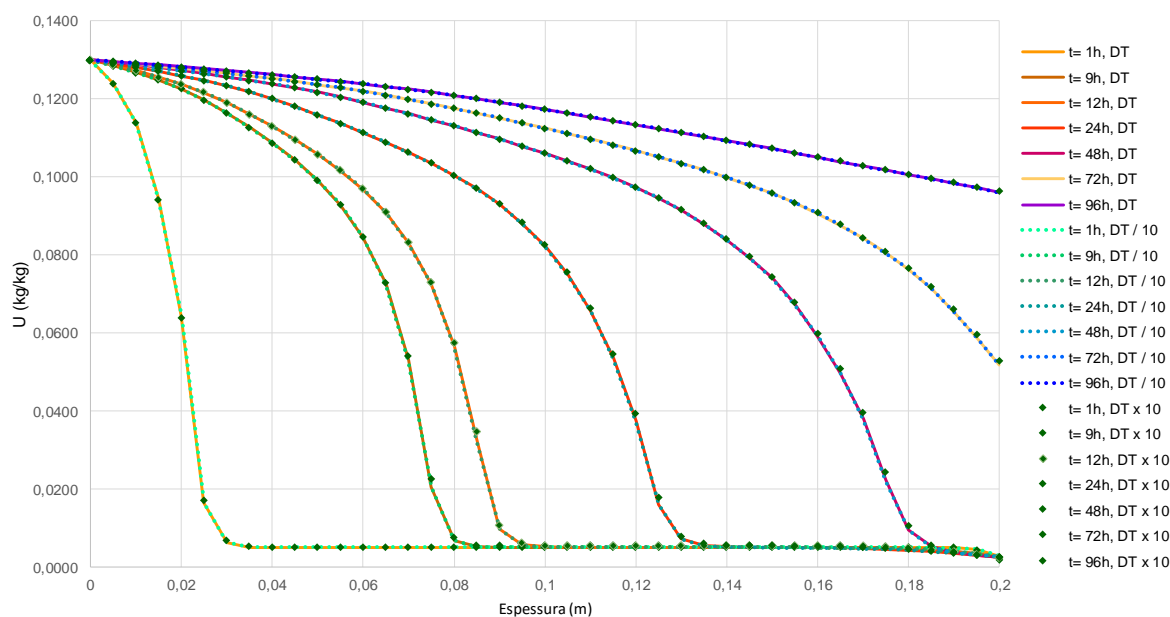


Figura 51 – Variação dos perfis do teor de umidade em embebição face à variação da difusividade higrotérmica do barro vermelho, considerando:  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 7-BVdt, **12-BVdt** e 13-BVdt).

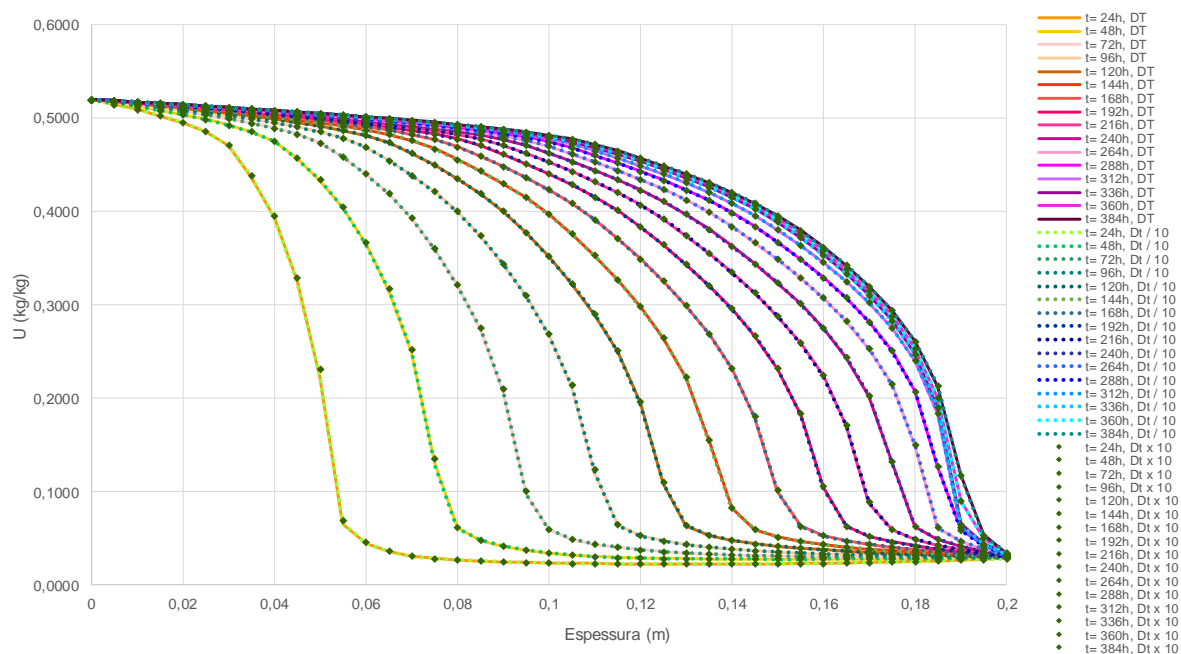


Figura 52 – Variação dos perfis do teor de umidade em embebição face à variação da difusividade higrotérmica do betão celular, considerando:  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 7-BCdt, **9-BCdt** e 10-BCdt).

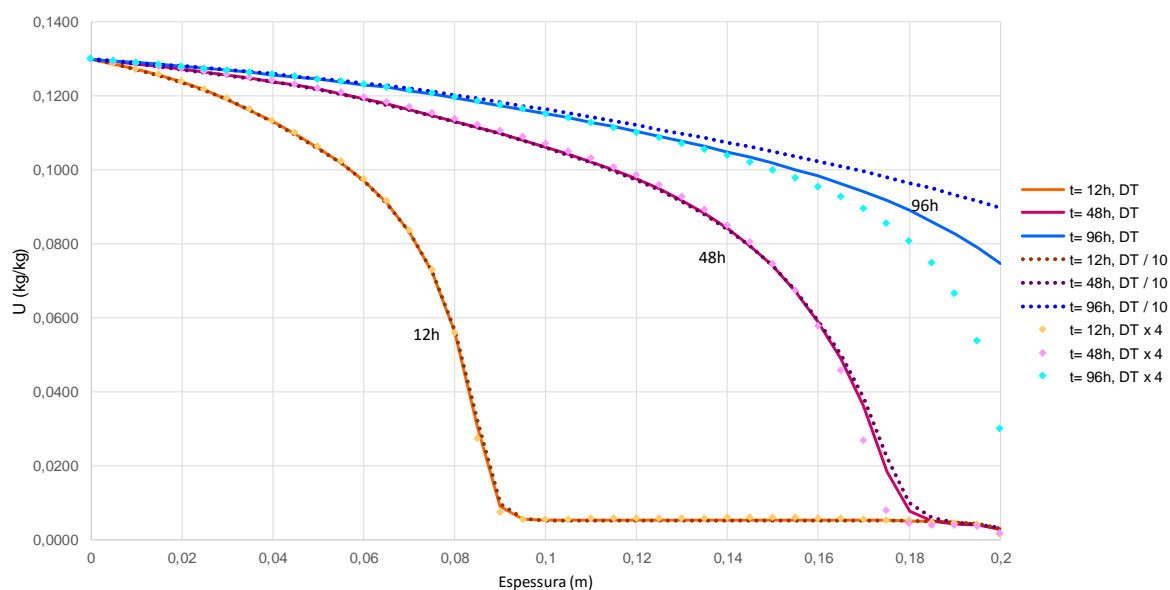


Figura 53 – Variação dos perfis do teor de humidade em embebição face à variação da difusividade higrotérmica do barro vermelho, considerando:  $T_{ext}=10^{\circ}C$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=50^{\circ}C$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 2-BVdt, 4-BVdt e 6-BVdt).

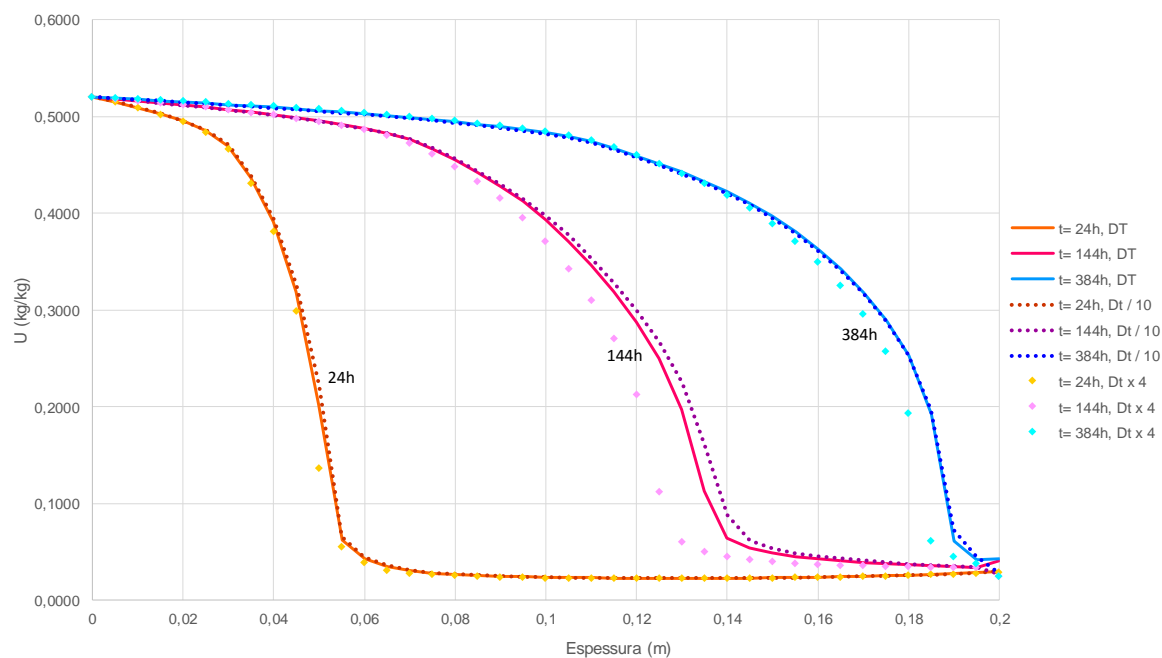


Figura 54 – Variação dos perfis do teor de humidade em embebição face à variação da difusividade higrotérmica do betão celular, considerando:  $T_{ext}=10^{\circ}C$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=50^{\circ}C$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 2-BCdt, 4-BCdt e 6-BCdt).

Na Figura 55 apresentam-se os resultados obtidos para o barro vermelho, aplicando um gradiente de temperatura em regime estacionário, mas em que desta vez a  $T_{ext}=50^{\circ}\text{C}$  e a  $T_{int}=10^{\circ}\text{C}$ . Os perfis do teor de humidade coincidem com o esperado, reforçando aparentemente o que foi dito anteriormente. De facto, nesta situação, o aumento de  $D_T$  traduz-se num ligeiro avanço da frente húmida em relação à situação de referência, sendo mais evidente ao fim de 96h de embebição, precisamente porque a transferência de humidade por capilaridade e o fenómeno da termomigração ocorrem no mesmo sentido.

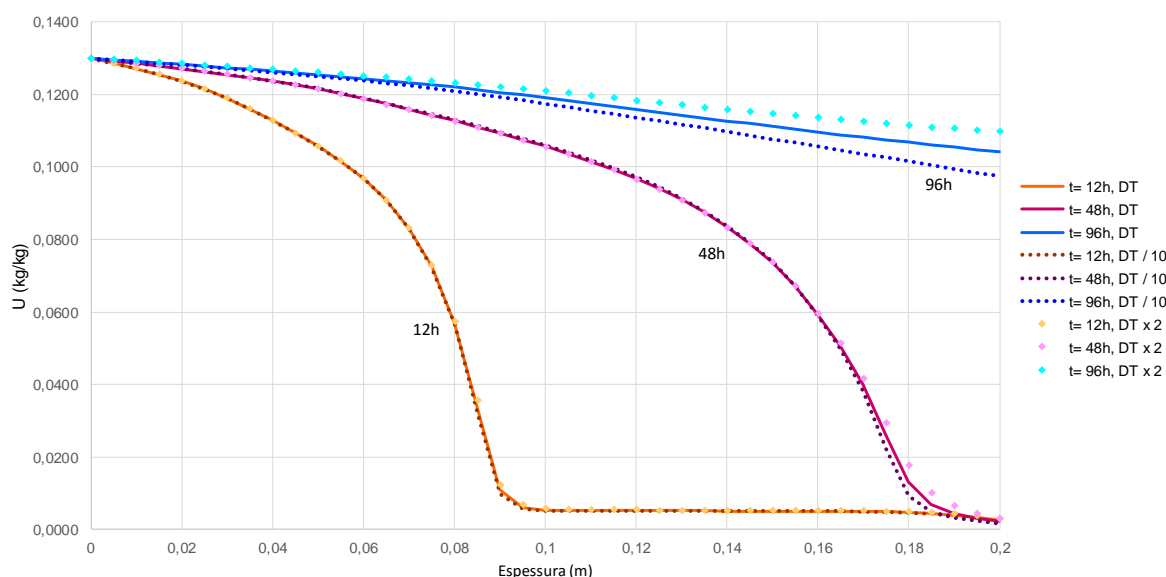


Figura 55 – Variação dos perfis do teor de humidade em embebição face à variação da difusividade higrotérmica do barro vermelho, considerando:  $T_{ext}=50^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=10^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 16-BVdt, 17-BVdt e 19-BVdt)

Analisando os resultados apresentados em 4.3.1.6 e 4.3.1.7, a comparação da influência de  $D_T$  e  $D_w$  nos perfis do teor de humidade, conduz à ideia de que a difusividade hídrica assume um papel significativamente mais importante no processo de embebição em materiais de construção porosos. De facto, as figuras apresentadas no corpo da dissertação revelam uma maior sensibilidade dos resultados à variação de  $D_w$ . Ainda que tal afirmação seja verdadeira, e que a difusividade hídrica constitua uma das propriedades mais influentes no processo de embebição, importa referir que em determinadas situações  $D_T$  também pode condicionar, de forma não desprezável, os resultados. Uma dessas situações ocorre quando se aplica um gradiente de temperatura que potencia o efeito da termomigração no mesmo sentido da transferência de humidade por capilaridade, e se aumenta  $D_T$ , para valores como os adotados nas simulações 14-BVdt e 11-BCdt, apresentadas no anexo 10.

#### 4.3.1.8. CONDUTIBILIDADE TÉRMICA

A gama de valores adotados na análise de sensibilidade dos perfis de embebição à variação da condutibilidade térmica, apresenta-se na Tabela 38. A noção da ordem de grandeza dos fatores majorativos e minorativos a aplicar às curvas  $\lambda(U,T)$ , características do barro vermelho e do betão celular, teve em conta a pesquisa elaborado no capítulo 3. A condutibilidade térmica dos materiais porosos tende a ser mais elevada à medida que o teor de humidade aumenta. No caso do barro vermelho, a diferença nos valores de  $\lambda$  quando o material passa de seco a saturado é de aproximadamente o dobro, isto é,  $\lambda_{seco} \approx 1$

$W/m.K$  e  $\lambda_{\text{saturado}} \approx 2 W/m.K$ . No betão celular a variação da condutibilidade térmica com o teor de humidade é menos evidente. Realizaram-se 22 simulações para analisar a influência desta propriedade no processo de embebição de materiais porosos, nas condições definidas na Tabela 39.

Tabela 38 – Gama de valores adotados na análise de sensibilidade da condutibilidade térmica.

Condutibilidade térmica, $\lambda$ [W/m.K]	• Barro vermelho	$\lambda \times 2$
		$\lambda \times 1,5$
		$\lambda \times 1,2$
		$\lambda$
		$\lambda / 2$
	• Betão celular	$\lambda \times 2$
		$\lambda \times 1,5$
		$\lambda \times 1,2$
		$\lambda$
		$\lambda / 2$

Tabela 39 - Simulações efetuadas no estudo de sensibilidade da condutibilidade térmica.

Exterior		Interior		$\lambda$ [W/m.K]		Ref. Material	
HR <sub>ext</sub>	T <sub>ext</sub>	T <sub>int</sub>	HR <sub>int</sub>	Barro V.	Betão C.	Barro V.	Betão C.
100%	10°C	50°C	50%	$\lambda \times 2$	$\lambda \times 2$	1-BV $\lambda$	1-BC $\lambda$
				$\lambda \times 1,5$	$\lambda \times 1,5$	2-BV $\lambda$	2-BC $\lambda$
				$\lambda \times 1,2$	$\lambda \times 1,2$	3-BV $\lambda$	3-BC $\lambda$
				$\lambda$	$\lambda$	4-BV $\lambda$	4-BC $\lambda$
	25°C	25°C	50%	$\lambda \times 2$	$\lambda \times 2$	5-BV $\lambda$	5-BC $\lambda$
				$\lambda \times 1,5$	$\lambda \times 1,5$	6-BV $\lambda$	6-BC $\lambda$
				$\lambda \times 1,2$	$\lambda \times 1,2$	7-BV $\lambda$	7-BC $\lambda$
				$\lambda$	$\lambda$	8-BV $\lambda$	8-BC $\lambda$
				$\lambda / 2$	$\lambda / 2$	9-BV $\lambda$	9-BC $\lambda$
	50°C	10°C	50%	$\lambda \times 2$	$\lambda \times 2$	10-BV $\lambda$	10-BC $\lambda$
				$\lambda$	$\lambda$	11-BV $\lambda$	11-BC $\lambda$






Das simulações efetuadas, selecionaram-se as mais relevantes para o corpo da dissertação de acordo com a Tabela 40.

Os resultados obtidos evidenciaram, que nas condições estudadas, quando a temperatura do ambiente exterior é igual à temperatura do ambiente interior, variações na condutibilidade térmica dos materiais não provoca alterações nos perfis do teor de humidade. Este resultado registou-se tanto para o barro vermelho como para o betão celular, como se pode analisar com mais detalhe consultando o anexo 11.

Quando se introduz um gradiente de temperatura em regime estacionário, a influência da condutibilidade nos perfis de embebição passa a ter significado, sendo mais notórias as diferenças para o barro vermelho do que para o betão celular, possivelmente porque as condições das ambiências adotadas só permitem a chegada da frente húmida à face interior do barro vermelho. Por este motivo, no corpo da dissertação apenas se apresentam os resultados para o barro vermelho, encontrando-se no anexo 11 os resultados obtidos para o betão celular, que evidencia um comportamento análogo quando submetido às mesmas condições, apenas menos evidente.



Tabela 40 – Organização das simulações.

Simulações	Descrição	Localização
	Influência de $\lambda$ quando $T_{ext}=T_{int}$	Anexo 11
		5-BV $\lambda$ 5-BC $\lambda$
		6-BV $\lambda$ 6-BC $\lambda$
		7-BV $\lambda$ 7-BC $\lambda$
		<b>8-BV<math>\lambda</math></b> <b>8-BC<math>\lambda</math></b>
		9-BV $\lambda$ 9-BC $\lambda$
	Influência de $\lambda$ introduzindo um gradiente de temperatura	Corpo da dissertação Figura 56
	Influência de $\lambda$ introduzindo um gradiente de temperatura	Anexo 11
		1-BC $\lambda$
		2-BC $\lambda$
		3-BC $\lambda$
	Influência de $\lambda$ introduzindo um gradiente de temperatura	Corpo da dissertação Figura 58
	Influência de $\lambda$ introduzindo um gradiente de temperatura	Anexo 11
		10-BC $\lambda$ 11-BC $\lambda$

Na Figura 56 é visível a influência do aumento da condutibilidade térmica, nos perfis do teor de humidade, principalmente quando a frente húmida atinge a face interior do barro vermelho. Quanto maior for o valor de  $\lambda$ , mais rápida é a progressão da frente húmida, e maiores são os valores dos teores de humidade atingidos, para uma  $T_{ext}=10^{\circ}\text{C}$  e uma  $T_{int}=50^{\circ}\text{C}$ .

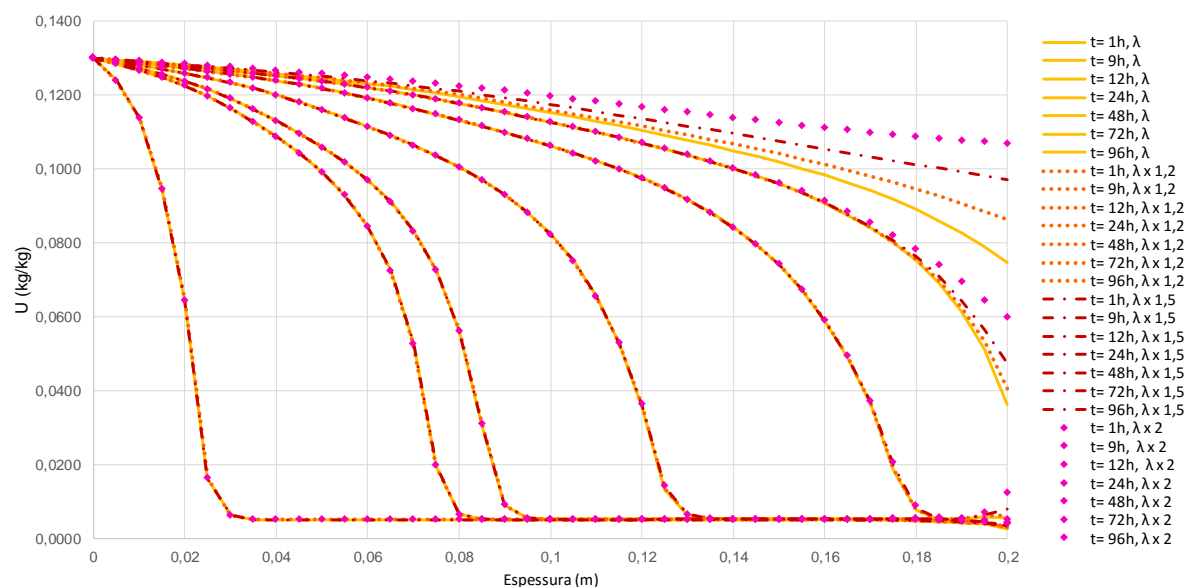


Figura 56 – Variação dos perfis do teor de humidade em embebição face à variação da condutibilidade térmica do barro vermelho, considerando:  $T_{ext}=10^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=50^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 1-BV $\lambda$ , 2-BV $\lambda$ , 3-BV $\lambda$  e 4-BV $\lambda$ ).

Os resultados anteriores podem ser explicados através dos perfis de temperatura apresentados na Figura 57, correspondes a 72h e 96h de embebição, quando já nenhuma parte do provete está seca. De facto, quanto maior for a condutibilidade térmica, menor é o gradiente de temperatura a que o material é sujeito, e consequentemente o fenómeno da termomigração, responsável neste caso pela transferência de humidade em sentido oposto à embebição por capilaridade, torna-se menos influente, permitindo a mais rápida progressão da frente húmida.

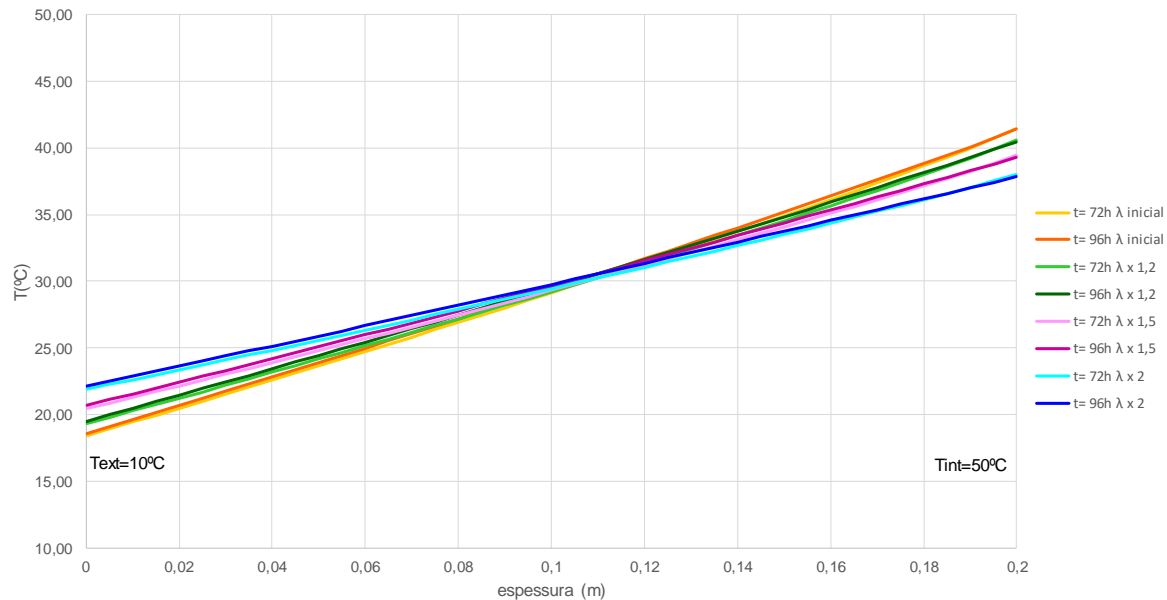


Figura 57 – Perfis de temperatura para o barro vermelho em função da condutibilidade térmica, ao fim de 72h e 96h do processo de embebição, considerando:  $T_{ext}=10^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=50^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 1-BV $\lambda$ , 2-BV $\lambda$ , 3-BV $\lambda$  e 4-BV $\lambda$ ).

Na Figura 58 e na Figura 59 apresentam-se os resultados de simulações idênticas às anteriores para o barro vermelho, mas desta vez aplicando um gradiente de temperatura em que a  $T_{ext}=50^{\circ}\text{C}$  e a  $T_{int}=10^{\circ}\text{C}$ .

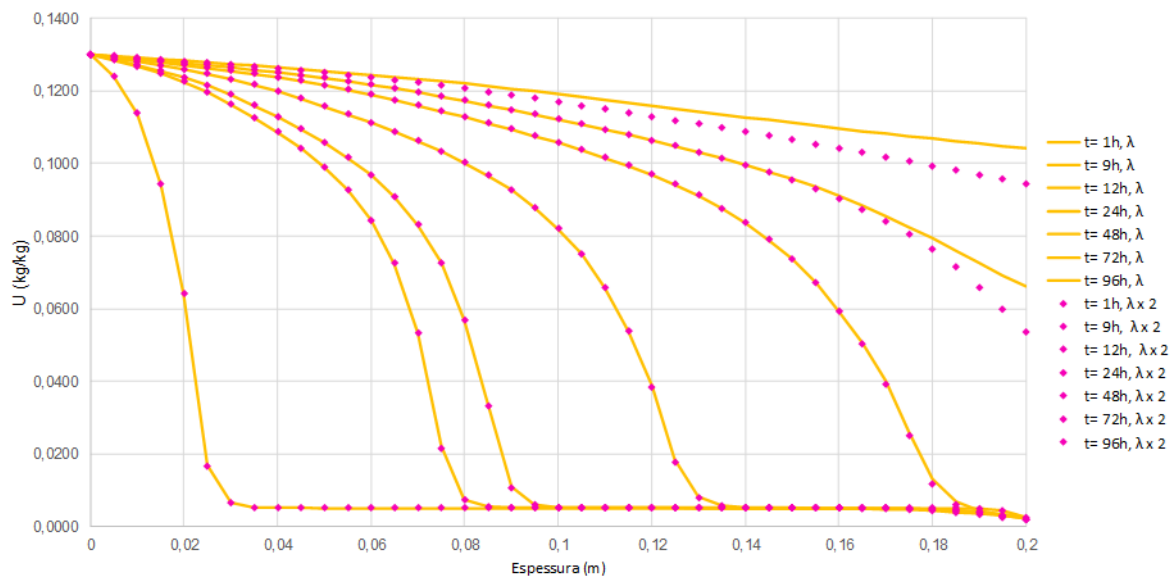


Figura 58 –Variação dos perfis do teor de humidade em embebição face à variação da condutibilidade térmica do barro vermelho, considerando:  $T_{ext}=50^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=10^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 10-BV $\lambda$  e 11-BV $\lambda$ ).

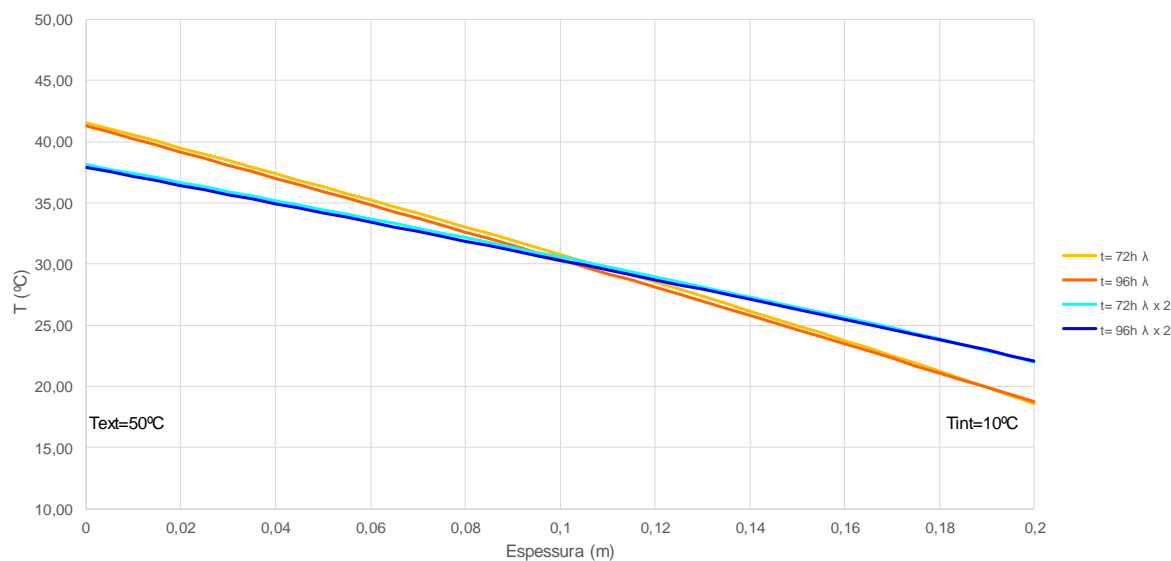


Figura 59 – Perfis de temperatura para o barro vermelho em função da condutibilidade térmica, ao fim de 72h e 96h do processo de embebição, considerando:  $T_{ext}=50^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=10^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 10-BV $\lambda$  e 11-BV $\lambda$ ).

Neste caso, o aumento da condutibilidade térmica é responsável por um menor gradiente de temperatura no material, à semelhança do verificado na situação anterior. Contudo, quando a  $T_{ext}=50^{\circ}\text{C}$  e a  $T_{int}=10^{\circ}\text{C}$  o efeito da termomigração ocorre no mesmo sentido da transferência da humidade por capilaridade, pelo que a diminuição do gradiente de temperatura a que o material é sujeito provoca um menor avanço da frente húmida.

#### 4.4. SÍNTESE DO CAPÍTULO

O estudo da influência de cada uma das propriedades no processo de embebição em materiais de construção porosos, permitiu organizar cada parâmetro quanto ao seu grau de influência (alta, média e baixa influência). Salvaguarda-se que a classificação atribuída resultou das simulações realizadas no barro vermelho e no betão celular, não se excluindo a possibilidade de materiais com diferentes características conduzirem a importâncias um pouco diferentes dos diversos parâmetros. A favor das conclusões obtidas, refere-se que em nenhuma das propriedades, a análise de sensibilidade revelou resultados contraditórios para os dois materiais, isto é, em nenhuma situação um aumento de um parâmetro provocou no barro vermelho uma mais rápida progressão da frente húmida e no betão celular o contrário (ou vice-versa). Apenas nalgumas propriedades, foi mais notória a sensibilidade dos resultados para o barro vermelho do que para o betão celular, por no primeiro caso a frente húmida atingir a face interior do elemento com mais facilidade. Assim, sendo, e apesar do vasto leque de simulações realizadas, reconhece-se a necessidade de desenvolver mais estudos, em diferentes condições das ambiências e para diferentes materiais, de modo a validar a classificação que se apresenta e propõe na Tabela 41. O conhecimento do grau de influência de cada propriedade nos resultados é muito importante para, em cada caso, se definir quais são as propriedades que se devem medir e aquelas que se podem estimar, evitando trabalhos experimentais demorados, onerosos e por vezes de difícil obtenção.

Tabela 41 – Grau de influência das propriedades no processo de embebição de materiais de construção porosos.

	Grau de influência da propriedade			Justificação
	Alta	Média	Baixa	
$\rho_0$ [kg/m <sup>3</sup> ]		✗		a)
$C_0$ [J/kg.K]			✗	b)
$\xi$ [-]	-	-	-	-
Curva higroscópica [kg/kg]		✗		c)
$S$ [Pa]	-	-	-	-
$D_w$ [m <sup>2</sup> /s]	✗			d)
$D_T$ [m <sup>2</sup> /s.K]		✗		e)
$\lambda$ [W/m.K]		✗		f)

- A massa volúmica seca do material, só condiciona os perfis do teor de humidade em embebição, nas situações onde a secagem na superfície interior dos elementos tem significado.
- Em regime estacionário de temperaturas, o calor específico do material seco não demonstrou ter influência nos resultados.
- A curva higroscópica de um material tem alguma influência no processo de embebição, sobretudo em materiais mais higroscópicos.
- A difusividade hídrica demonstrou ser o parâmetro com mais influência nos perfis do teor de humidade. Pequenas variações na curva de  $D_w(U)$  repercutem-se em grandes diferenças nos resultados.
- A difusividade higrotérmica só aparenta ter influência quando os valores de  $D_T$  se aproximam da ordem de grandeza dos valores de  $D_w$  e estão associados a grandes gradientes de temperatura.
- A condutibilidade térmica revela alguma influência nos resultados quando se aplica um gradiente de temperatura.

# 5

## VALIDAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO TRHUMIDADE

### 5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo procurou-se validar os perfis de embebição obtidos com o programa TRHUMIDADE, para o barro vermelho e para o betão celular, comparando-os com os resultados fornecidos pelo programa WUFI Pro 5.2 e com os resultados experimentais obtidos por *Vasco Freitas* no Laboratório de Física das Construções (LFC) na década de 80 [1]. Procurou-se ainda evidenciar algumas potencialidades dos modelos que utilizam o gradiente do teor de humidade como motor na transferência de humidade, face aos que utilizam o gradiente de humidade relativa, referindo-se as desvantagens e limitações de cada um.

### 5.2. COMPARAÇÃO DOS PERFIS DE EMBEBIÇÃO EM MATERIAIS POROSOS UTILIZANDO O TRHUMIDADE E O WUFI PRO 5.2

Uma das formas de validar os resultados fornecidos pelo programa TRHUMIDADE consiste em compará-los com os obtidos através de outras ferramentas de simulação higrótérmica. De entre os diversos programas existentes capazes de simular a transferência conjunta de calor e humidade selecionou-se o WUFI Pro 5.2, por ser um programa comercial com grande utilização internacional e validação experimental, desenvolvido no *Fraunhofer IBP*. O WUFI Pro 5.2 permite analisar, a uma dimensão (1D), a transferência de calor e humidade num componente de um edifício. As propriedades dos materiais requeridas para o cálculo em cada um dos programas não são exatamente as mesmas, o que constituiu, neste trabalho, uma dificuldade acrescida, que pode justificar algumas disparidades nos perfis de embebição obtidos nos dois programas. Na Tabela 42 apresenta-se a lista das propriedades utilizadas pelo WUFI Pro 5.2 e pelo TRHUMIDADE.

Tabela 42 – Propriedades dos materiais requeridas pelo WUFI Pro 5.2 e TRHUMIDADE.

Propriedades requeridas pelos programas	
WUFI Pro 5.2	TRHUMIDADE
• Massa volúmica seca, $\rho_0$ [kg/m <sup>3</sup> ]	• Massa volúmica seca, $\rho_0$ [kg/m <sup>3</sup> ]
• Calor específico do material seco, $C_0$ [J/kg.K]	• Calor específico do material seco, $C_0$ [J/kg.K]
• Porosidade, $\xi$ [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	• Porosidade, $\xi$ [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
• Curva higroscópica [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	• Curva higroscópica [kg/kg]
• Condutibilidade térmica do material seco (T=10°C) e $\lambda$ (U) [W/m.K]	• Condutibilidade térmica, $\lambda$ (U) [W/m.K]

Propriedades requeridas pelos programas	
WUFI Pro 5.2	TRHUMIDADE
<ul style="list-style-type: none"> <li>Coeficiente de transferência de água líquida:  <math>D_{ws}</math> – coeficiente de transferência de água líquida por sucção [<math>m^2/s</math>];  <math>D_{ww}</math> – Coeficiente de transferência de água líquida por redistribuição [<math>m^2/s</math>].</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Difusividade higríca, <math>D_w</math> [<math>m^2/s</math>]</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Fator de resistência à difusão do vapor de água do material seco, <math>\mu</math> [-]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Difusividade higrotérmica, <math>D_{\tau}</math> [<math>m^2/s.K</math>]</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sucção capilar, <math>S</math> [Pa]</li> </ul>

O conceito de curva higroscópica a introduzir nos dois programas não é exatamente o mesmo. No TRHUMIDADE insere-se uma curva que expressa a variação do teor de humidade higroscópico,  $U_h$  (kg/kg), em função da humidade relativa da ambiência,  $HR(\%)$ , até ao teor de humidade crítico,  $U_{cr}$  (kg/kg), correspondente à saturação da ambiência,  $HR=100\%$ . Por outro lado, a curva higroscópica necessária de introduzir no WUFI Pro 5.2, corresponde a uma função que relaciona os valores do teor de humidade,  $W(kg/m^3)$ , desde o zero absoluto até ao teor de humidade máximo,  $W_{máx}$  ( $kg/m^3$ ), abrangendo, portanto, o domínio higroscópico e o domínio capilar. De facto, a designação de curva higroscópica requerida pelo WUFI Pro 5.2, resulta da tradução de *Moisture storage function*, que se representa na Figura 60. Assim, uma das dificuldades na obtenção dos perfis de embebição do barro vermelho e do betão celular, recorrendo ao WUFI Pro 5.2, passou por compatibilizar os dados disponíveis no TRHUMIDADE sobre os dois materiais, para a forma exigida pelo WUFI Pro 5.2. A curva presente na Figura 60 pode ser aproximada pelo programa WUFI Pro 5.2, apenas através da introdução do teor de humidade correspondente a uma  $HR$  de 80%,  $W_{80}$  ( $kg/m^3$ ), e do teor de humidade de saturação, designado pelo programa por  $W_f$  ( $kg/m^3$ ). Contudo, de forma a que os dados de entrada nos dois programas fossem os mais próximos possíveis, a curva da Figura 60 foi introduzida no WUFI Pro 5.2 através da colocação de valores numa tabela.

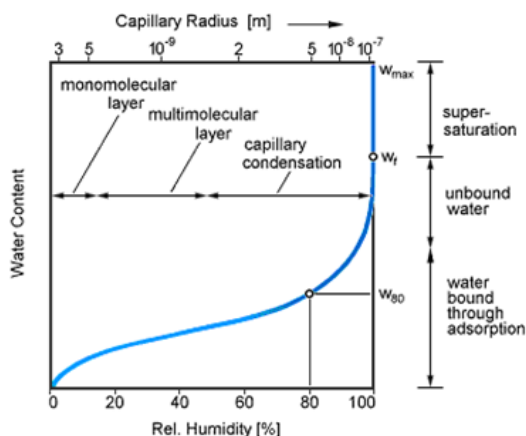


Figura 60 - *Moisture storage function* [15]

Na Tabela 43, exemplifica-se para o barro vermelho os valores utilizados na definição da referida curva. No TRHUMIDADE, os teores de humidade são expressos em kg/kg, pelo que houve o cuidado de convertê-los para  $kg/m^3$ , multiplicando pela massa volúmica seca do respetivo material. Uma vez que o WUFI Pro 5.2, não permite a atribuição de diferentes valores do teor de humidade a uma mesma  $HR=100\%$ , o teor de humidade crítico do barro vermelho,  $W_{cr}=17,325kg/kg$ , foi definido para uma  $HR=95\%$ . A definição deste limite da  $HR$  como fronteira do domínio higroscópico é aconselhado por

diversos autores diretamente relacionados com o desenvolvimento do próprio programa [30]. Salva-se que a atribuição do  $W_{cr}$  a outros valores da HR, mais próximos do de saturação, tem implicações relevantes nos perfis do teor de humidade obtidos em processos de embebição. Na Tabela 43 é ainda possível observar que o valor mais elevado do teor de humidade introduzido corresponde ao teor de humidade de saturação ( $W_{sat}=250,25\text{kg/m}^3$ ) e não ao teor de humidade máximo como seria de esperar pela Figura 60. Como o objetivo é comparar os resultados do processo de embebição nos dois programas, e como tal estudo apenas justificou a consideração do teor de humidade de saturação como valor máximo atingido no TRHUMIDADE, por uma questão de igualdade o mesmo se efetuou no programa WUFI Pro 5.2. Para o betão celular, utilizou-se o mesmo procedimento para a definição da curva *Moisture storage function*.

Tabela 43 – Curva do teor de humidade em função da HR introduzida no WUFI Pro 5.2, para o barro vermelho.

Barro vermelho – curva do teor de humidade em função da HR							
Valores introduzidos no WUFI Pro 5.2		Dados do TRHUMIDADE					
<i>Moisture storage function</i>		VLIN (kg/kg)	VLIN (kg/m <sup>3</sup> )	Curva higroscópica (HR(%), U(kg/kg))		Curva higroscópica (HR(%), W(kg/m <sup>3</sup> ))	
HR (-)	W(kg/m <sup>3</sup> )	0	0	0	0	0	0
0	0	0,005	9,625	80	0,004	<b>80</b>	<b>7,7</b>
0,8	7,7	0,01	19,25	100	0,009	<b>100</b>	<b>17,325</b>
<b>0,95</b>	<b>17,325</b>	0,02	38,5				
<b>1</b>	<b>250,25</b>	0,04	77				
		0,07	134,75				
		0,09	173,25				
		0,11	211,75				
		0,12	231				
		0,13	<b>250,25</b>				

O coeficiente de transferência de água líquida definido pelo WUFI Pro 5.2, corresponde à difusividade hídrica,  $D_w$  utilizada pelo TRHUMIDADE. A diferença reside no facto de que no programa WUFI, esta propriedade é diferenciada em: coeficiente de transferência de água líquida por sucção,  $D_{ws}$ , e coeficiente de transferência de água líquida por redistribuição,  $D_{ww}$ . O primeiro coeficiente descreve a absorção capilar de água quando a superfície absorvente está completamente húmida, enquanto o segundo descreve a propagação de água absorvida quando o humedecimento estiver concluído, ou seja, quando já não há mais entrada de água vinda do exterior, e a água presente no material começa a redistribuir-se [15]. Atendendo às condições de simulação adotadas no TRHUMIDADE, onde a face exterior dos materiais está constantemente saturada, optou-se por considerar os valores de  $D_w$ , utilizados nas simulações com o programa TRHUMIDADE, como representativos do coeficiente de transferência de água líquida por sucção,  $D_{ws}$ , desprezando-se a transferência de água líquida por redistribuição,  $D_{ww}$ . Assim, os valores de  $D_{ws}$  em função do teor de humidade inseridos no programa WUFI Pro 5.2 para o barro vermelho e para o betão celular, encontram-se no anexo 4, referido no capítulo 2.

O fator de resistência à difusão de vapor do material seco,  $\mu$ , é uma propriedade utilizada apenas pelo WUFI Pro 5.2. Assim, os valores utilizados como característicos para o barro vermelho e para o betão celular, foram respetivamente:  $\mu=77$  e  $\mu=7,5$ . Estes valores foram retirados de [31], para um barro vermelho com  $\rho_0=1900\text{kg/m}^3$  (valor próximo do barro vermelho estudado, cujo  $\rho_0=1925\text{kg/m}^3$ ), sendo que no caso do betão celular o valor de  $\mu=7,5$  foi selecionado de entre uma gama de valores,  $\mu \in [3,12]$ , definida como característicos desse material.

No WUFI Pro 5.2, introduziu-se para os dois materiais, o respetivo valor da condutibilidade térmica do material seco a 10°C, igual ao utilizado no TRHUMIDADE, uma vez que essa informação era conhecida. Também os valores que traduzem a dependência de  $\lambda$  com o teor de humidade coincidem nos dois programas.

Os valores da massa volúmica seca, da porosidade e do calor específico do barro vermelho e do betão celular, sendo propriedades comuns aos dois programas, não constituem um fator de dispersão dos resultados.

Para além do cuidado na aproximação das propriedades dos materiais introduzidas nos dois programas, houve também a preocupação de considerar a mesma condutância térmica superficial exterior e interior ( $h_e=h_i=25 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ ) e a mesma temperatura e teor de humidade inicial dos materiais, já apresentadas no anexo 3 do capítulo 2. No WUFI Pro 5.2, considerou-se que não havia qualquer redução da chuva incidente (fator de redução da chuva incidente = 1), para aproximar ao comportamento do TRHUMIDADE. As condições do clima exterior, semelhantes às adotadas no TRHUMIDADE, foram possíveis de inserir no WUFI Pro 5.2 através da utilização de um ficheiro, que permite considerar uma HR e temperatura constantes.

Na Figura 61 e na Figura 62 apresenta-se a comparação dos peris de embebição resultantes da aplicação dos dois programas, para o barro vermelho e para o betão celular, respetivamente. Os resultados apresentados, correspondem à consideração de uma  $T_{\text{ext}}=T_{\text{int}}=T_{\text{inicial provete}}=20^\circ\text{C}$ , uma  $HR_{\text{ext}}=100\%$  e uma  $HR_{\text{int}}=50\%$ . As horas adotadas nas simulações correspondem às utilizadas nas análises de sensibilidade elaboradas no capítulo 4.

Apesar das diferenças entre os dois programas, e salvaguardando algumas simplificações adotadas no WUFI Pro 5.2, pode-se concluir que os perfis do teor de humidade fornecidos pelos dois programas são muito próximos, o que atendendo à enorme validação e aceitação dos resultados fornecidos pelo WUFI Pro 5.2, valida os resultados do TRHUMIDADE.

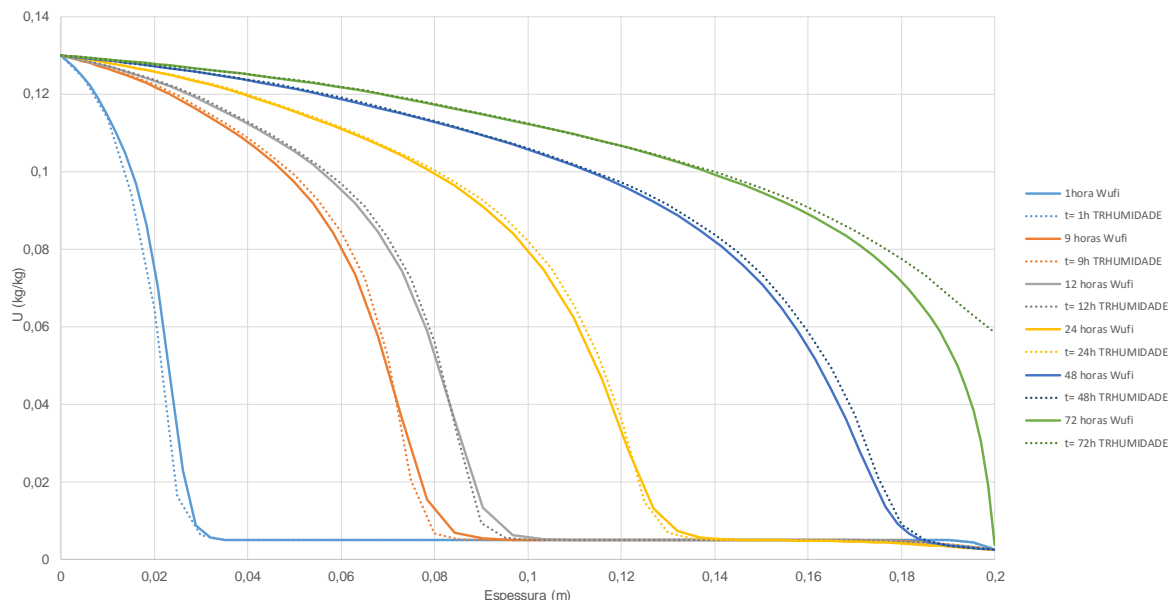


Figura 61 - Comparação dos perfis de embebição do barro vermelho, utilizando o TRHUMIDADE e o WUFI Pro 5.2, considerando:  $T_{\text{ext}}=T_{\text{int}}=T_{\text{inicial provete}}=20^\circ\text{C}$ ,  $HR_{\text{ext}}=100\%$  e  $HR_{\text{int}}=50\%$ .



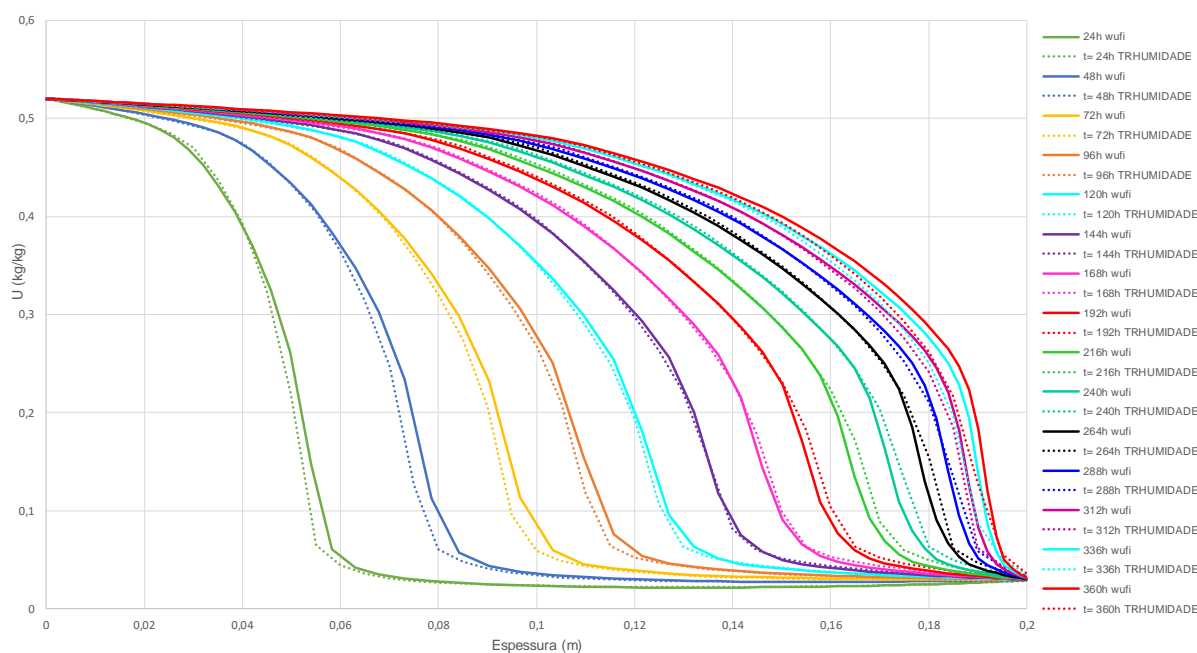


Figura 62 – Comparação dos perfis de embebição do betão celular, utilizando o TRHUMIDADE e o WUFI Pro 5.2, considerando:  $T_{ext}=T_{int}=T_{inicial\ provete}=20^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$  e  $HR_{int}=50\%$ .

### 5.3. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM OS OBTIDOS PELOS PROGRAMAS TRHUMIDADE E WUFI PRO 5.2

Quando o TRHUMIDADE foi desenvolvido em 1992, o autor do programa procedeu à sua validação a partir da determinação experimental dos perfis do teor de humidade. A técnica de medida utilizada baseou-se na medição dos teores de humidade por atenuação de radiação gama, implicando na altura a conceção e montagem do dispositivo apresentado na Figura 63. Refira-se que no passado ano de 2015 foi possível associar um dispositivo mecânico ao equipamento da Figura 63, tornado hoje possível obter de forma automática e programada os valores dos perfis de teor de humidade experimentalmente no Laboratório de Física das Construções (LFC).



Figura 63 – Esquema do equipamento utilizado na medição dos teores de humidade por atenuação de radiações gama, existente no LFC da FEUP.

O princípio geral de medição envolvido nesta técnica já foi apresentado no subcapítulo 3.6. Neste trabalho, utilizaram-se os resultados experimentais obtidos por *Vasco Freitas* [1], que foram atualmente aproximados por uma função polinomial, no caso do barro vermelho, e pela média dos resultados, no caso do betão celular, com vista à melhor correlação possível ( $R$  mais elevado). Atendendo a que as horas dos resultados experimentais disponíveis para os dois materiais não coincidem com as estudadas nas análises de sensibilidade efetuadas, houve necessidade de repetir as simulações nos dois programas para essas mesmas horas. Um outro aspeto que se veio a revelar importante prende-se com as condições de laboratório em que os ensaios foram realizados. De facto, ao contrário dos resultados das simulações apresentados na Figura 61 e na Figura 62, obtidos para uma temperatura ambiente de 20°C, coincidente com a temperatura inicial dos materiais, a informação disponível sobre as condições em que foram elaborados os resultados experimentais apenas aponta para uma temperatura de 25°C. Assim, houve também o cuidado de reproduzir no TRHUMIDADE e no WUFI Pro 5.2 essas condições, pelo que na Figura 64 e na Figura 65 encontra-se a comparação dos perfis de embebição obtidos experimentalmente e recorrendo aos dois programas de simulação estudados, para uma  $T_{\text{ext}}=T_{\text{int}}=T_{\text{inicial do provete}}=25^{\circ}\text{C}$ .

Tendo em conta o grande número de parâmetros envolvidos e a complexidade do fenómeno, considera-se que os resultados da Figura 64 e da Figura 65 evidenciam uma boa correlação entre os perfis do teor de humidade experimentais e os resultados obtidos com os dois programas, principalmente para elevados teores de humidade. Salvaguarda-se que uma melhor aproximação entre os resultados numéricos e os resultados experimentais seria possível se a difusividade hídrica,  $D_w$ , fosse ajustada, visto no capítulo anterior se ter demonstrado que pequenas alterações neste parâmetro provocam mudanças significativas nos resultados.

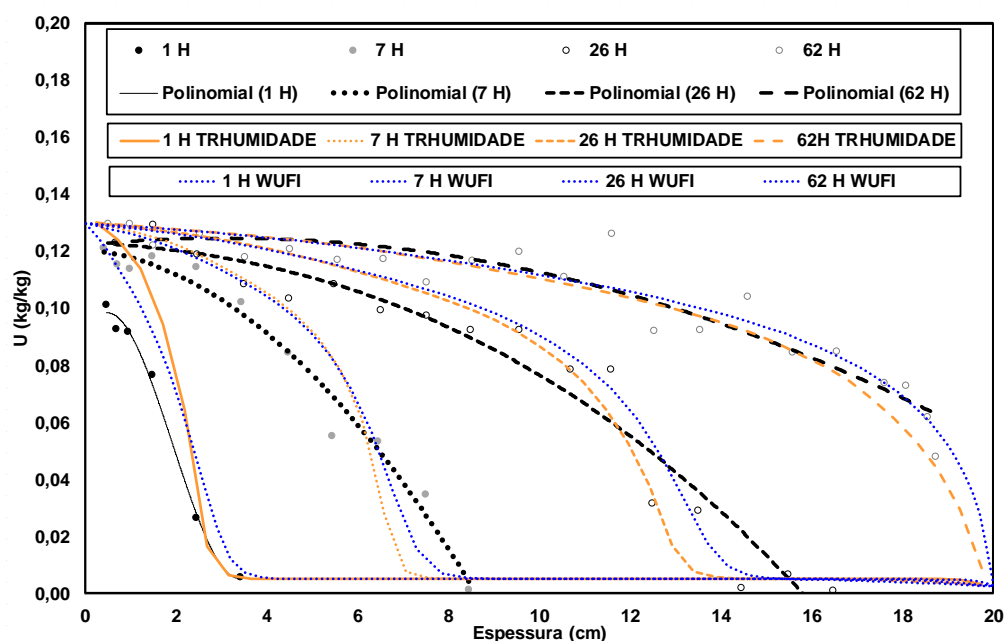


Figura 64 – Comparação dos perfis de embebição do barro vermelho, obtidos experimentalmente por atenuação de radiação gama (cinzento) e pelos programas de simulação TRHUMIDADE (amarelo) e WUFI Pro 5.2 (azul), considerando:  $T_{\text{ext}}=T_{\text{int}}=T_{\text{inicial provete}}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{\text{ext}}=100\%$  e  $HR_{\text{int}}=50\%$ .

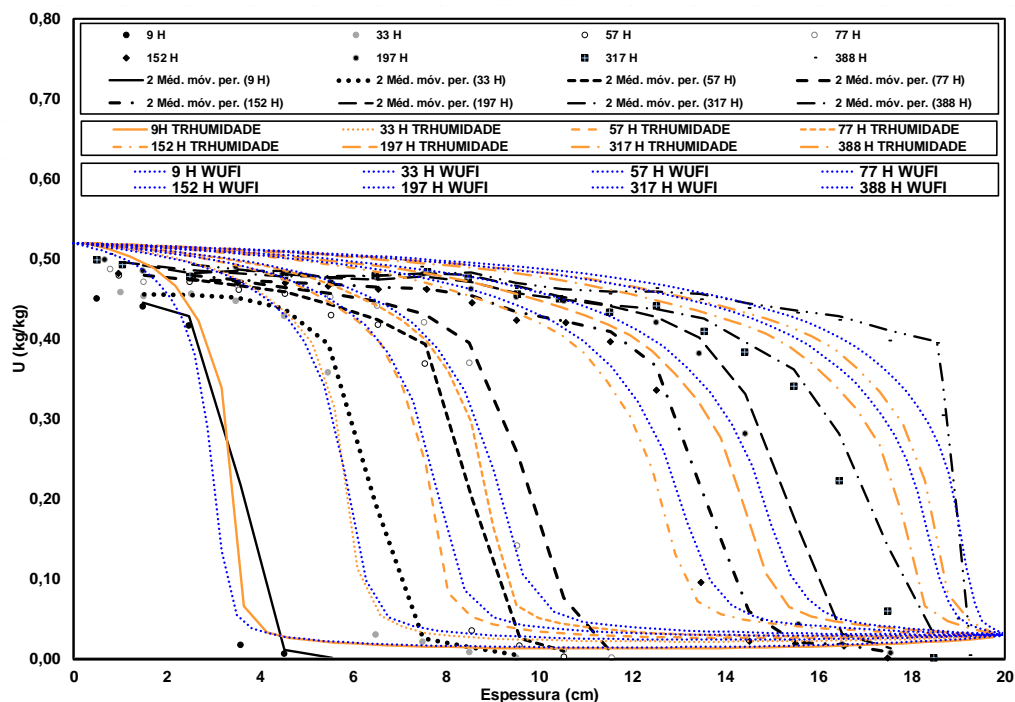


Figura 65 - Comparação dos perfis de embebição do betão celular, obtidos experimentalmente por atenuação de radiação gama (cinzento) e pelos programas de simulação TRHUMIDADE (amarelo) e WUFI Pro 5.2 (azul), considerando:  $T_{ext}=T_{int}=T_{inicial\ provete}=25^{\circ}C$ ,  $HR_{ext}=100\%$  e  $HR_{int}=50\%$ .

A Figura 64 e a Figura 65 revelaram, contudo, uma maior dispersão entre os perfis de embebição obtidos com os programas TRHUMIDADE e WUFI Pro 5.2. De facto, e ainda que comparados em horas diferentes, os perfis do teor de humidade no barro vermelho e no betão celular, resultantes da aplicação dos dois programas, apresentavam maiores semelhanças na Figura 61 e na Figura 62. Atendendo a que a única diferença entre as Figuras 61 e 62 e as Figuras 64 e 65 corresponde à mudança de temperatura de  $20^{\circ}C$  para  $25^{\circ}C$ , conforme ilustrado, respetivamente, pelas situações a) e b1) da Figura 66, sentiu-se necessidade de efetuar um conjunto de simulações com os dois programas noutras condições de temperatura, por forma a compreender as diferenças encontradas.

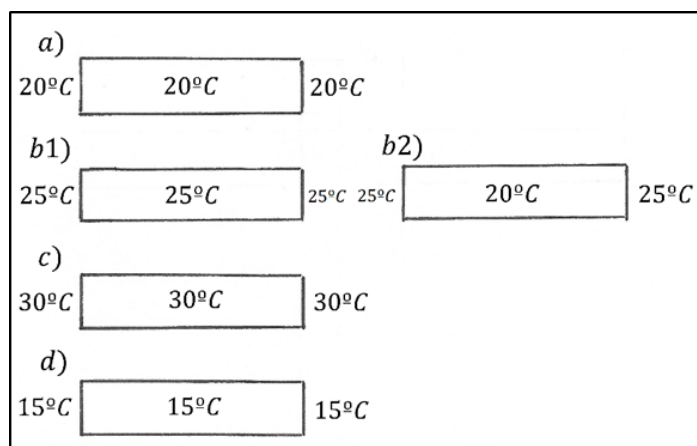


Figura 66 – Combinações de temperaturas iniciais dos materiais e das ambiências estudadas nos programas TRHUMIDADE e WUFI Pro 5.2.

Na Figura 67 e na Figura 68, comparam-se os perfis de embebição no betão celular, obtidos respetivamente pelo TRHUMIDADE e pelo WUFI Pro 5.2. para as diferentes condições de temperatura esquematizadas na Figura 66.

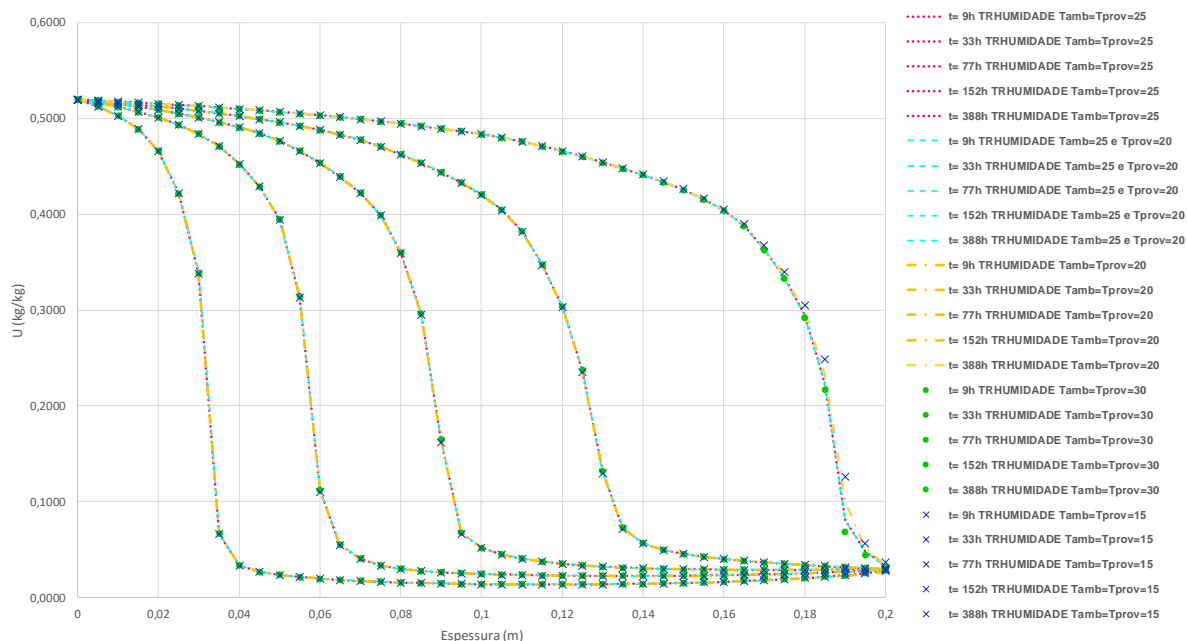


Figura 67 – Comparação dos perfis de embebição no betão celular utilizando o TRHUMIDADE, considerando:  $HR_{ext}=100\%$ ,  $HR_{int}=50\%$  e variando as condições das temperaturas segundo as situações a), b1), b2), c) e d) definidas na Figura 66.

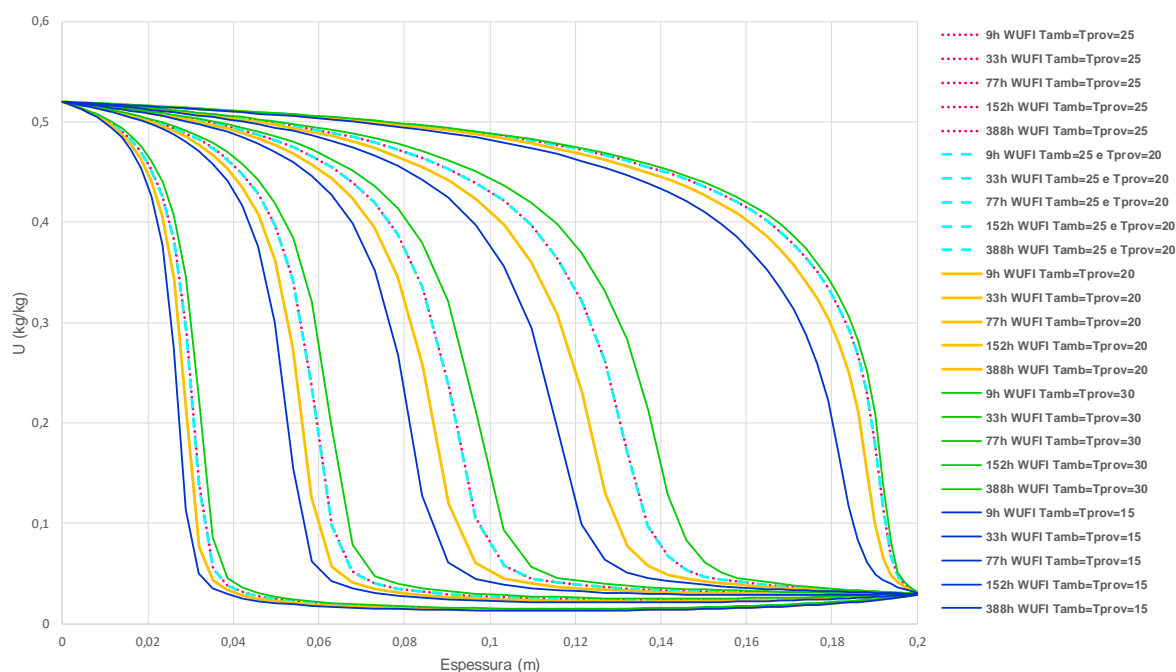


Figura 68 - Comparação dos perfis de embebição no betão celular utilizando o WUFI Pro 5.2, considerando:  $HR_{ext}=100\%$ ,  $HR_{int}=50\%$  e variando as condições das temperaturas segundo as situações a), b1), b2), c) e d) definidas na Figura 66.

Os resultados anteriores evidenciam que nenhum dos programas, para as condições estudadas, é sensível a um pequeno gradiente de temperatura entre as ambiências e a temperatura inicial do material, situação correspondente a b2) da Figura 66. Este resultado está de acordo com as conclusões obtidas por *Maria Clara Vale [29]*, referidas em 4.2. Contudo, enquanto que as situações a), b1), c) e d) representadas na Figura 66, conduzem a perfis de embebição praticamente coincidentes, quando se utiliza o programa TRHUMIDADE, o mesmo não acontece utilizando o programa WUFI Pro 5.2. Neste último caso, à medida que a temperatura aumenta, há uma maior progressão da frente húmida, registando-se a situação inversa quando a temperatura diminui. Esta diferença no comportamento dos dois programas, explica porque é que na Figura 64 e na Figura 65 se verifica uma maior dispersão entre os perfis fornecidos pelo TRHUMIDADE e pelo WUFI Pro 5.2, com um ligeiro avanço da frente húmida gerada por este último face ao primeiro, principalmente para longos períodos de embebição. Apesar de não se conseguir justificar a influência da temperatura, nas condições estudadas, no comportamento dos dois programas, identificou-se uma diferença que merece atenção em estudos posteriores.

#### 5.4. POTENCIALIDADES DO TRHUMIDADE

Neste trabalho, o programa TRHUMIDADE foi utilizado para simular o processo de embebição de água em materiais de construção porosos monolíticos. Contudo, as potencialidades do programa são muito mais vastas. O TRHUMIDADE constitui uma ferramenta de análise do fenómeno de transferência conjunta de calor e humidade através das paredes dos edifícios, com inevitável atenção para a influência da interface entre camadas. O conhecimento das diferentes condições de continuidade entre camadas, e o contributo para a resolução da transferência de calor e humidade nas diferentes condições de contacto, constituiu a verdadeira motivação para criação do programa de simulação em 1992. O TRHUMIDADE utiliza como potencial de transferência de humidade o gradiente do teor de humidade. Uma das desvantagens frequentemente apontadas a este tipo de modelos é a descontinuidade no perfil do teor de humidade na interface entre dois materiais de construção porosos. De facto, o diferente comportamento higroscópico dos materiais, conduz, por exemplo, a que materiais mais higroscópicos retenham um maior teor de humidade, para a mesma temperatura e humidade relativa [2]. Para contornar o problema da interface, muitos programas, como é exemplo o programa WUFI Pro 5.2, utilizam o gradiente de humidade relativa como potencial condutor da transferência de humidade, por se manter constante nos elementos de fronteira [30]. Na Figura 69, procura-se ilustrar uma das desvantagens desta última abordagem. De facto, o maior aumento nos valores do teor de humidade de um material, ocorre para uma gama muito estreita de humidades relativas, e consequentemente pequenos acréscimos de HR próximos da de saturação, repercutem-se em diferenças significativas nos valores do teor de humidade. Assim, é natural que para teores de humidade muito elevados, a utilização do gradiente de humidade relativa como potencial de transferência conduza a uma menor precisão do que a utilização do gradiente do teor de humidade. O problema da resistência hídrica, gerada entre duas camadas de materiais contíguas, quando não há continuidade da estrutura porosa, também é abordado de forma diferente pelo TRHUMIDADE e pelo WUFI Pro 5.2. Enquanto no primeiro, a contabilização dessa resistência implica a determinação de um parâmetro que descreve o fluxo máximo de humidade que atravessa a interface – FLUMAX ( $\text{kg/m}^2.\text{s}$ ) – obtido através de um procedimento experimental relativamente simples [1], no segundo caso, a contabilização dessa resistência implica a criação de uma camada fictícia que perturba os fluxos transmitidos. Assim, apesar do problema da interface, nos métodos que utilizam o gradiente do teor de humidade como potencial de transferência, não estar completamente solucionado, estes métodos revelam um enorme potencial para descrever a transferência de calor e humidade, sobretudo em situações que envolvam elevados valores do teor de humidade, como é o caso de simulações para caracterizar o efeito da chuva [2]. Para além do TRHUMIDADE, outros programas como UMIDUS[32] e o MOIST [33],

tem sido desenvolvidos, evidenciando que o teor de humidade pode ser utilizado como motor no processo de transferência de humidade. Uma outra vantagem, que tem sido apontada para este tipo de modelos, é que a não consideração do fenómeno de *histereses*, implica menos erros nos resultados [2].

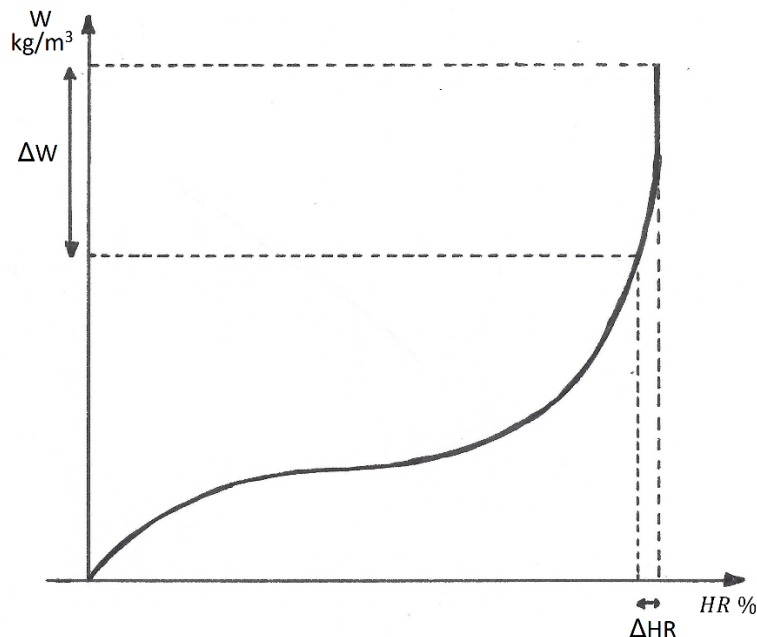


Figura 69 – Vantagem da utilização do gradiente do teor de humidade face ao gradiente de humidade relativa, como potencial de transferência de humidade.

Assim, apesar da comparação dos perfis de embebição obtidos pelo TRHUMIDADE e pelo WUFI Pro 5.2, elaborada em 5.2 e 5.3, evidenciar resultados muito semelhantes, espera-se que para simulações com interface e elevados teores de humidade, o programa TRHUMIDADE conduza a resultados mais próximos da realidade.

## 5.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO

Em síntese, as principais conclusões a retirar deste capítulo são as seguintes:

- O estudo do processo de absorção de água em materiais de construção porosos com o programa TRHUMIDADE e WUFI Pro 5.2, evidenciou resultados dos perfis de embebição muito semelhantes entre os dois programas. Uma melhor aproximação entre os resultados poderá ser conseguida com a determinação experimental das propriedades dos materiais requeridas pelo WUFI Pro 5.2, que não são comuns ao TRHUMIDADE, como é o caso do fator de resistência à difusão de vapor. A introdução no WUFI Pro 5.2 de uma curva que traduza o teor de humidade do material em função da humidade relativa (*Moisture storage function*), com mais rigor e mais próxima do comportamento do material obtido experimentalmente, poderá também contribuir para uma maior aproximação dos resultados obtidos pelos dois programas, uma vez que pequenas alterações nesta curva têm consequências nos resultados.
- Os perfis de embebição obtidos experimentalmente, por recurso à atenuação de radiações gama, evidenciam uma boa correlação com os resultados das simulações nos dois programas, principalmente para teores de humidade mais elevados.
- Os perfis de embebição do TRHUMIDADE evidenciaram não ser sensíveis ao aumento da temperatura das ambiências, ao contrário dos obtidos pelo WUFI Pro 5.2, que demonstraram um maior avanço, à medida que a temperatura da ambiência aumentava. Estes resultados foram

apenas estudados para o betão celular, pelo que conclusões mais assertivas à cerca do comportamento dos dois programas exigirá um estudo mais aprofundado noutras condições e para outros materiais.

- Os programas que trabalham com o gradiente do teor de humidade como potencial de transferência de humidade, revelam um enorme potencial para uma caracterização mais rigorosa de situações que envolvam teores de humidade muito elevados, como é exemplo a análise do efeito da chuva.





## 6 CONCLUSÕES

### 6.1. SÍNTESE DAS CONCLUSÕES OBTIDAS

A pesquisa efetuada sobre as propriedades necessárias à execução do programa TRHUMIDADE, as análises de sensibilidade realizadas e a comparação dos resultados com o programa de simulação WUFI Pro 5.2, permitiu retirar as seguintes conclusões principais:

- A massa volúmica seca do material,  $\rho_0$ , condiciona os perfis do teor de humidade em embebição, sobretudo em situações onde a secagem na superfície interior dos elementos tem significado. O grau de influência médio deste parâmetro nos resultados, aliado à sua simples determinação experimental e vasta disponibilidade na literatura, possibilita a adoção de valores estimados, quando se pretende simular o comportamento em embebição de um material;
- De todas as propriedades, o calor específico do material seco,  $C_0$ , foi a única que não demonstrou ter influência no processo de absorção de água em materiais de construção porosos. Além disso, a fácil disponibilidade com que se encontram valores desta propriedade na bibliografia, permite que este parâmetro seja estimado, quando se elaboram simulações com diferentes materiais;
- Em materiais mais higroscópicos, a variabilidade da curva higroscópica demonstrou ter influência nos resultados. Apesar da dificuldade em encontrar na literatura estas curvas, a sua determinação é simples (apenas morosa), pelo que se aconselha a determinar experimentalmente esta propriedade, de cada vez que se pretende estudar a embebição de materiais higroscópicos com o TRHUMIDADE;
- De todas as propriedades a difusividade hídrica,  $D_w$ , foi a que demonstrou maior influência na evolução dos perfis do teor de humidade. De facto, pequenas variações na curva  $D_w(U)$  repercutem-se em grandes diferenças nos resultados. Infelizmente, trata-se de uma propriedade cujo procedimento experimental é complexo e lento, e a disponibilidade na literatura é escassa. Assim, a simulação do processo de absorção de água num qualquer material de construção poroso, implica, a sua determinação experimental para garantir a correta reprodução do seu real comportamento. A grande influência deste propriedade justifica que Vasco Freitas [1] tenha determinado experimentalmente este parâmetro para o barro vermelho e para o betão celular, não recorrendo a valores fornecidos por outros autores;
- A difusividade higrotérmica,  $DT$ , só revelou influência nos perfis do teor de humidade em determinadas condições. De facto, só quando os valores de  $DT$  se aproximam dos valores de  $D_w$ , e estão associados a elevados gradientes de temperaturas, é que o fenómeno da termomigração passa a influenciar a transferência de humidade. Nessas condições aconselha-se a que a curva

de  $DT(U)$  seja obtida experimentalmente para o material em estudo, evitando-se a realização de estimativas. A disponibilidade na literatura de valores para esta propriedade é muita reduzida, e a sua obtenção experimental é complexa e morosa, pelo que se torna conveniente identificar as situações onde a sua influência é condicionante;

- A condutibilidade térmica dos materiais revela alguma influência nos resultados quando se aplica um gradiente de temperatura. Assim, nessas situações torna-se importante determinar experimentalmente o valor desta propriedade para o material em estudo, o que envolve procedimentos experimentais de moderada exigência. Para simulações efetuadas em condições isotérmicas o seu valor pode ser estimado, salvaguarda-se, contudo, que é difícil encontrar na bibliografia valores para esta propriedade calculados em função do teor de humidade  $\lambda(U)$ ;
- A sucção capilar,  $S$ , apesar de não ter qualquer influência quando se simula a absorção de água em provetes monolíticos, é uma propriedade muito importante quando se estuda a transferência de humidade através da fronteira entre dois materiais de construção porosos. O procedimento experimental envolvido na sua obtenção é complexo e moroso, e a disponibilidade na literatura das curvas de sucção é escassa;
- Os perfis de embebição fornecidos pelo TRHUMIDADE demonstraram ser muito semelhantes aos obtidos utilizando o WUFI Pro 5.2, programa amplamente utilizado e validado, o que reforça os resultados obtidos com o programa de simulação TRHUMIDADE.

## **6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Ao terminar esta dissertação, fica claro que existe ainda um vasto campo de investigação a percorrer neste domínio. De seguida apresenta-se uma descrição de trabalhos futuros que se consideram relevantes para o avanço do conhecimento e para transposição desse conhecimento para a prática da engenharia civil:

- Apesar de neste trabalho não se ter estudado o fenómeno da interface, simulando a transferência de humidade em elementos constituídos por duas camadas, o programa TRHUMIDADE apresenta essa capacidade. Contudo, situações com múltiplas interfaces ainda não são possíveis de estudar no programa. Assim, o desenvolvimento futuro dessa potencialidade, permitiria uma melhor adequação do programa aos problemas reais, atendendo à crescente complexidade dos elementos construtivos das envolventes dos edifícios,
- Uma aplicação prática interessante, possível a partir dos resultados fornecidos pelo TRHUMIDADE, seria a construção de ábacos que permitissem quantificar o avanço da frente húmida (velocidade de embebição), para os materiais porosos correntemente utilizados na construção;
- Continuar o desenvolvimento de estudos que permitam definitivamente comprovar que os modelos que utilizam o gradiente do teor de humidade como potencial de transferência, como o TRHUMIDADE, são válidos, e em situações que envolvam teores de humidade elevados serão até vantajosos de utilizar, para simular condições práticas correntes da engenharia civil;
- Melhorar a forma como o programa TRHUMIDADE contabiliza a ocorrência de precipitação, de modo a tornar possível inserir um determinado valor da chuva incidente retirado de um ficheiro meteorológico, evitando que a indicação da existência de precipitação implique a imediata consideração do teor de humidade de saturação na face exterior dos elementos construtivos. Deste modo, conseguir-se-ia contabilizar o efeito do clima exterior de uma forma mais próxima da realidade;

- Continuar o trabalho de aumentar a base de dados do TRHUMIDADE, com a recolha completa das características físicas e higrotérmicas de um conjunto vasto de materiais correntemente utilizados na construção, no formato exigido pelo programa;
- Analisar a possibilidade de no futuro as propriedades dos materiais, dependestes do teor de humidade, poderem ser inseridas no programa TRHUMIDADE, sem que necessariamente estejam todas em função dos mesmos teores de humidade inseridos no vetor VLIN. Esta possibilidade facilitaria a criação da base de dados do programa, na medida em que permitiria que cada um dos parâmetros fosse introduzido em função de um diferente teor de humidade, isto é, de forma independente;
- Validar numericamente o programa TRHUMIDADE, para várias situações que não foram aqui consideradas, procurando, nomeadamente, averiguar a razão da discrepância dos resultados obtidos entre o TRHUMIDADE e o WUFI Pro 5.2, em situações semelhantes, face à variabilidade das propriedades com a temperatura.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] V. P. de Freitas, *Transferência de humidade em paredes de edifícios: análise do fenómeno de interface*, Tese de doutoramento, Porto, FEUP, 1992.
- [2] N. Mendes, P. Philippi, *A method for predicting heat and moisture transfer through multilayered walls based on temperature and moisture content gradients*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 02/08/2004, pág. 1-3, ELSEVIER.
- [3] R. Fauconnier, *Etude des transferts simultanés de chaleur et d'humidité dans les parois multicouches. Application à la modélisation du comportement hygrothermiques des locaux en régime varié - Annexe Propriétés hygrothermiques des matériaux de construction*, Direction de la recherche UTI, Saint-Rémy-les Chevreuse, Novembro 1982.
- [4] V. Abrantes, *Análise numérica e experimental do comportamento térmico de coberturas com desvão*, Tese de doutoramento, Porto, FEUP, 1984.
- [5] A. Radu, E. Barreira, H. Saber, H. Hens, J. Vinha, M. Vasilache, M. Bomberg, O. Koronthalyova, P. Matiasovsky, R. Becker, T. Kalamees, V.P. de Freitas, W. Maref, *Heat, air and moisture transfer terminology-parameters and concepts*, CIB, FEUP, LFC, 2012.
- [6] EN ISO 12570, *Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of moisture content by drying at elevated temperature* (ISO 12570:2000)
- [7] EN 12524, *Building materials and products - hygrothermal properties - tabulated design values* (CEN 2000).
- [8] M. I. M. Torres, *Humidade ascensional em paredes de construções históricas*, Tese de doutoramento, Coimbra, 2004.
- [9] R. Foconnier, *Influence de l'humidité sur la consommation énergétique d'un bâtiment en chauffage discontinu - Modélisation et couplage des phénomènes: L'humidité dans le bâtiment* seminário organizado com a colaboração da UNESCO e do collège international des sciences de la construction à Saint Remy les chevreuse, France, pág. 147-186, 1982.
- [10] I. A. Novo, *Propriedades higrotérmicas de materiais: construção de base de dados estocásticos para simulação numérica*, Tese de mestrado integrado, Porto, FEUP, 2012.
- [11] J. G. Lanzinha, *Propriedades higrotérmicas de materiais de construção*, Tese de doutoramento, coimbra, FCTUC, 1998.
- [12] V.P. de Freitas, M. I. M. Torres, A. S. Guimarães, *Humidade ascensional*, FEUP Edições, 2008.
- [13] V. P. de Freitas, P. Pinto, *Permeabilidade ao Vapor de Materiais de Construção - condensações internas*, Nota de informação técnica - NIT ° 002 - LFC, 1998.
- [14] K. K. Hansen, *Sorption isotherms: A catalogue*, Technical University of Denmark: Building materials laboratory, 1986.
- [15] *WUFI PRO 5.0 online help Fraunhofer - IBP, Germany*
- [16] M. Janz, *Methods of measuring the moisture diffusivity at high moisture levels*, Tese de licenciatura, Lund, 1997.

- [17] H. M. Künzel, *Simultaneous heat and moisture transport in building components. One-and two-dimensional calculation using simple parameters*, Tese de Doutorado, IBP, 1995.
- [18] M. Kumaran, *Moisture diffusivity of building materials from water absorption measurements*, *Journal of Building Physics*, National Research Council of Canada, 1999.
- [19] B. Perrin, *Etude des transferts couplés de chaleur et de masse dans les matériaux poreux consolidés non saturés utilisés en génie civil*, Tese de Doutorado, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1985.
- [20] R. Fauconnier, B. Florence, A. Laugier, *Le transfert d'humidité dans les matériaux isolants*, Promoclim-E, Etudes thermiques d' Aérauliques, Tome 10E n°3, 1979.
- [21] J. Van Der Kooi, *Moisture transport in cellular concrete roofs*, Tese de doutorado, Eindhoven University of Technology, Waltman, Delft, 1971.
- [22] P. Crausse, *Étude fondamentale des transferts couplés de chaleur et d'humidité en milieu poreux non saturé*, Tese de doutorado, Insitut Nacional Polytechnique de Toulouse, 1983.
- [23] J. Zach, S. Stastnik, *Assessment of thermal conductivity of the building materials-'Hot wire method'*, International Symposium (NDT-CE 2003), Brno, Czech Republic, 2003.
- [24] D. Quenard, H. Salee, R. Cope, *Caractérisation microstructurale et hygrothermique des matériaux de construction*, CIB89, Paris, 1989.
- [25] M. Janz, B. F. Johannesson, *Measurement of the moisture storage capacity using sorption balance and pressure extractors*, *Journal of Building Physics*, 2001.
- [26] G. Fagerlund, *Determination of pore size distribution by suction prosimetry*, *Matériaux et Construction*, vol. 6, N°33, 1973.
- [27] M. H. Hansen, *Estimation of transfer coefficients in models for coupled heat and moisture transfer in porous media*, Tese de doutorado, Technical University of Denmark, Lyngby, 1993.
- [28] N. Standard, *Retention curve and pore size distribution*, NT BUILD, 1997.
- [29] C. P. Vale, *Simulação numérica da transferência de humidade em materiais de construção*, Tese de mestrado, Porto, FEUP, 1999.
- [30] H. M. Künzel, K. Kiessl, *Calculation of heat and moisture transfer in exposed building components*, *International Journal of heat and mass transfer*, vol. 40, pág. 159-167, 1996.
- [31] V.P de Freitas, P. Pinto, *Permeabilidade ao Vapor de Materiais de Construção–Condensações Internas*, *Nota de informação técnica - NIT° 002*, LFC, 1998.
- [32] N. Mendes, I. Ridley, R. Lamberts, P. C. Philippi, K. Budag, *UMIDUS: a PC program for the prediction of heat and moisture transfer in porous building elements*, *Proceedings of the sixth international IBPSA Conference, Building Simulation*, Kyoto, Japan, 1999.
- [33] D. Burch, *An analysis of moisture accumulation in walls subjected to hot and humid climates*, *ASHRAE Trans.* 1993.

## **Anexo 1**

### **DADOS DE ENTRADA: INTDADOS**

# Ficheiro INTDADOS – barro vermelho

```

1
0.20 3 0.005 1925.00 0920.00 0.000
90 01 01 00.00
90 01 05 04.00
0.0000011 25.00 25.00 0.00300 0.00300 0000.0 0180.0 0042.0
0008.0 0180.0 0000.5
0.000e+00 0.000e+00 0.000e+00 0.000e+00 0.000e+00 0.000e+
00 0.000e+00 0.000e+00 0.000e+00 0.000e+00
0.000e+00 0.000e+00
    
```

# Ficheiro INTDADOS – betão celular

```

1
0.20 1 0.005 0525.00 1050.00 0.000
90 01 01 00.00
90 01 17 04.00
0.0000011 25.00 25.00 0.00300 0.00300 0000.0 0180.0
0042.0 0008.0 0180.0 0000.5
0.000e+00 0.000e+00 0.000e+00 0.000e+00 0.000e+00
0.000e+00 0.000e+00 0.000e+00 0.000e+00 0.000e+00
0.000e+00 0.000e+00
    
```

Código de leitura do ficheiro INTDADOS (i=código do material):

1					
2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13
...	...	...	...	...	...
14	15	16	17		
18	19	20	21		
22	23	24	25	26	
27	28	29	30	31	32
33	34	35	36	37	38
39	40	41	42		

1 – Número de camadas  
2,8 – Espessura da camada i (m)  
3,9 – Código da camada i  
4,10 – Distância entre dois nós sucessivos da malha de cálculo  $\Delta x$  da camada i (m)  
5,11 – Massa volumica seca da camada i (kg/m<sup>3</sup>)  
6,12 – Calor específico da camada i (J/kg.K)  
7,13 – Existência ou não de espaço de ar (1/0)  
14 – Ano do início da simulação  
15 – Mês do início da simulação  
16 – Dia do início da simulação  
17 – Hora do início da simulação  
18 – Ano do fim da simulação  
19 – Mês do fim da simulação  
20 – Dia do fim da simulação  
21 – Hora do fim da simulação  
22 – Erro máximo entre iterações sucessivas  
23 – Condutância térmica superficial exterior –  $h_e$  (W/m<sup>2</sup>.°C)  
24 – Condutância térmica superficial interior –  $h_i$  (W/m<sup>2</sup>.°C)  
25 – Coeficiente de transferência superficial de humidade exterior –  $\beta_e$  (m/s)  
26 – Coeficiente de transferência superficial de humidade interior –  $\beta_i$  (m/s)  
27 – Velocidade do vento (m/s)  
28 – Direção do vento  
29 – Latitude do lugar  
30 – Longitude  
31 – Orientação da parede  
32 – Coeficiente de absorção da parede –  $\alpha$   
33 – Fluxo máximo transmitido na interface do material 1 para o material 2 (kg/m<sup>2</sup>.s)  
34 – Fluxo máximo transmitido na interface do material 1 para o material 3 (kg/m<sup>2</sup>.s)  
35 – Fluxo máximo transmitido na interface do material 2 para o material 3 (kg/m<sup>2</sup>.s)  
36 – Fluxo máximo transmitido na interface do material 2 para o material 1 (kg/m<sup>2</sup>.s)  
37 – Fluxo máximo transmitido na interface do material 3 para o material 2 (kg/m<sup>2</sup>.s)  
38 – Fluxo máximo transmitido na interface do material 3 para o material 1 (kg/m<sup>2</sup>.s)  
39 – Fluxo máximo transmitido na interface do material 1 para o material 1 (kg/m<sup>2</sup>.s)  
40 – Fluxo máximo transmitido na interface do material 2 para o material 2 (kg/m<sup>2</sup>.s)  
41 – Fluxo máximo transmitido na interface do material 3 para o material 3 (kg/m<sup>2</sup>.s)  
42 – Fluxo máximo transmitido na interface quando há um espaço de ar (kg/m<sup>2</sup>.s)



## **Anexo 2**

DADOS DE ENTRADA: METE

### Ficheiro METE – barro vermelho

1000	25.00	100.00	0.0	25.00	50.00	4.00	0.1000	0.00	1.000	0.00
------	-------	--------	-----	-------	-------	------	--------	------	-------	------

### Ficheiro METE – betão celular

3880	25.00	100.00	0.0	25.00	50.00	4.00	0.1000	0.00	1.000	0.00
------	-------	--------	-----	-------	-------	------	--------	------	-------	------

Código de leitura do ficheiro METE:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11									

- 1– Número de intervalos de tempo em que as condições climáticas são mantidas
- 2– Temperatura exterior (°C)
- 3– Humidade relativa exterior (%)
- 4– Radiação solar em plano horizontal (W/m<sup>2</sup>)
- 5– Temperatura interior (°C)
- 6– Humidade relativa interior (%)
- 7– Higrometria (g/m<sup>3</sup>) – utilização eventual
- 8– Intervalo de tempo (h)
- 9– Fluxo térmico de entrada (W/m<sup>2</sup>) – utilização eventual
- 10– Ocorrência de precipitação (1-sim/0-não)
- 11– Fluxo térmico de saída (W/m<sup>2</sup>) – utilização eventual

### **Anexo 3**

#### **DADOS DE ENTRADA: SOLIN E SOLIT**

### Ficheiro SOLIN e SOLIT– betão celular

[illegible][illegible]

## **Anexo 4**

### **DADOS DE ENTRADA: COEFICIENTES FENOMENOLÓGICOS**

**VLIN – barro vermelho**

0.000	0.005	0.010	0.020	0.040
0.070	0.090	0.110	0.120	0.130

**COL– barro vermelho**

3		
10.00	30.00	50.00

**Matriz de  $D_W(U,T)$  – barro vermelho**

10	0.130	0.009				
2.50E-09	2.02E-09	1.54E-09	2.64E-09	6.53E-09	2.21E-08	
5.61E-08	1.37E-07	1.78E-07	3.91E-07			
2.50E-09	2.02E-09	1.54E-09	2.64E-09	6.53E-09	2.21E-08	
5.61E-08	1.37E-07	1.78E-07	3.91E-07			
2.50E-09	2.02E-09	1.54E-09	2.64E-09	6.53E-09	2.21E-08	
5.61E-08	1.37E-07	1.78E-07	3.91E-07			

**Matriz de  $D_T(U,T)$  – barro vermelho**

4.95E-12	6.30E-12	1.03E-11	1.53E-11	1.88E-11	1.77E-11
1.56E-11	1.08E-11	7.85E-12	4.95E-12		
4.95E-12	6.30E-12	1.03E-11	1.53E-11	1.88E-11	1.77E-11
1.56E-11	1.08E-11	7.85E-12	4.95E-12		
4.95E-12	6.30E-12	1.03E-11	1.53E-11	1.88E-11	1.77E-11
1.56E-11	1.08E-11	7.85E-12	4.95E-12		

**Matriz de  $\lambda(U,T)$  – barro vermelho**

1.00E+00	1.05E+00	1.09E+00	1.18E+00	1.36E+00	1.55E+00
1.69E+00	1.84E+00	1.92E+00	2.00E+00		
1.00E+00	1.05E+00	1.10E+00	1.19E+00	1.38E+00	1.58E+00
1.72E+00	1.86E+00	1.93E+00	2.00E+00		
1.00E+00	1.05E+00	1.10E+00	1.20E+00	1.39E+00	1.60E+00
1.73E+00	1.87E+00	1.93E+00	2.05E+00		

**Matriz de  $S(U,T)$  – barro vermelho**

8.00E+08	4.42E+08	8.35E+07	1.34E+06	7.14E+05	2.02E+05
1.26E+05	5.05E+04	1.26E+04	2.87E+03		
8.00E+08	4.42E+08	8.35E+07	1.34E+06	7.14E+05	2.02E+05
1.26E+05	5.05E+04	1.26E+04	2.87E+03		
8.00E+08	4.42E+08	8.35E+07	1.34E+06	7.14E+05	2.02E+05
1.26E+05	5.05E+04	1.26E+04	2.87E+03		

**VLIN– betão celular**

0.011 0.016 0.031 0.062 0.158  
 0.272 0.388 0.472 0.500 0.511  
 0.520

**COL– betão celular**

3  
 10.00 30.00 50.00

**Matriz de  $D_w(U,T)$  – betão celular**

11 00.520 00.278  
 8.06E-08 6.27E-08 8.90E-09 1.44E-09 5.39E-10 5.20E-09  
 1.16E-08 2.72E-08 9.84E-08 1.26E-07 1.49E-07  
 8.06E-08 6.27E-08 8.90E-09 1.44E-09 5.39E-10 5.20E-09  
 1.16E-08 2.72E-08 9.84E-08 1.26E-07 1.49E-07  
 8.06E-08 6.27E-08 8.90E-09 1.44E-09 5.39E-10 5.20E-09  
 1.16E-08 2.72E-08 9.84E-08 1.26E-07 1.49E-07

**Matriz de  $D_T(U,T)$  – betão celular**

2.01E-13 2.46E-13 2.91E-12 8.36E-12 2.14E-11 3.18E-11  
 3.81E-11 3.75E-11 3.28E-11 1.95E-11 1.56E-12  
 2.01E-13 2.46E-13 2.91E-12 8.36E-12 2.14E-11 3.18E-11  
 3.81E-11 3.75E-11 3.28E-11 1.95E-11 1.56E-12  
 2.01E-13 2.46E-13 2.91E-12 8.36E-12 2.14E-11 3.18E-11  
 3.81E-11 3.75E-11 3.28E-11 1.95E-11 1.56E-12

**Matriz de  $\lambda(U,T)$  – betão celular**

0.140 0.142 0.149 0.163 0.211 0.278 0.313 0.337 0.345 0.348  
 0.351  
 0.141 0.144 0.153 0.171 0.241 0.345 0.400 0.414 0.419 0.421  
 0.422  
 0.144 0.148 0.161 0.187 0.277 0.430 0.565 0.611 0.618 0.620  
 0.617

**Matriz de  $S(U,T)$  – betão celular**

7.87E+08 6.90E+08 4.00E+08 1.81E+07 8.40E+05 2.30E+05  
 8.65E+04 2.42E+04 1.04E+04 4.96E+03 5.18E+02  
 7.87E+08 6.90E+08 4.00E+08 1.81E+07 8.40E+05 2.30E+05  
 8.65E+04 2.42E+04 1.04E+04 4.96E+03 5.18E+02  
 7.87E+08 6.90E+08 4.00E+08 1.81E+07 8.40E+05 2.30E+05  
 8.65E+04 2.42E+04 1.04E+04 4.96E+03 5.18E+02





## **Anexo 5**

AUMENTO DO TEMPO DE SIMULAÇÃO NO BETÃO CELULAR, PARA AS CONDIÇÕES  
DE BASE

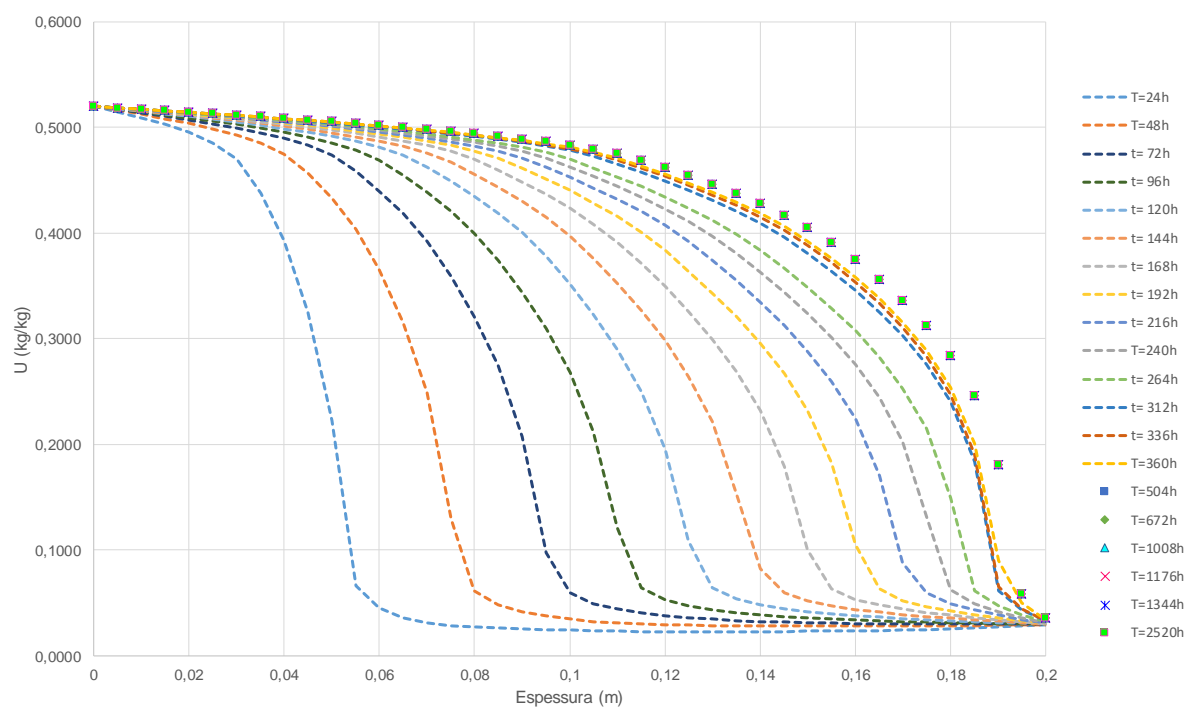


Figura 1 – Estabilização da progressão da frente húmida no betão celular, para longos períodos de embebição, para as condições de referência:  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$ .

## **Anexo 6**

SIMULAÇÕES PARA A ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA MASSA VOLÚMICA SECA,  $\rho_0$

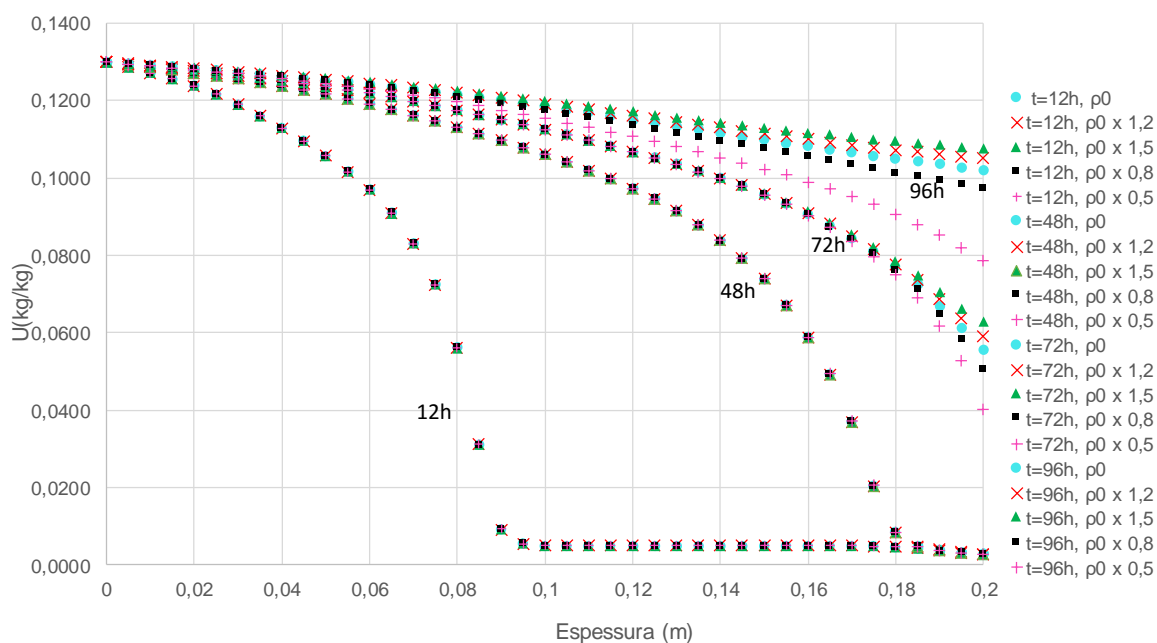


Figura 2 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição face à variação da massa volúmica seca do barro vermelho, considerando  $T_{ext}=10^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 16-BVp, 17-BVp, 18-BVp, 19-BVp e 20-BVp).

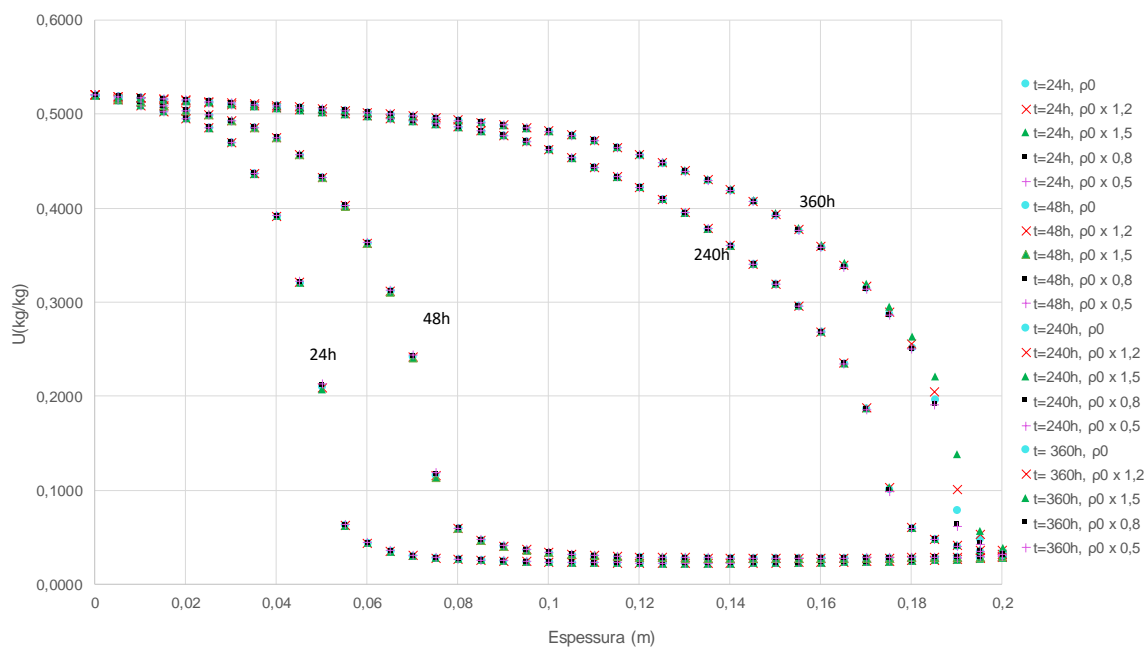


Figura 3 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição face à variação da massa volúmica seca do betão celular, considerando  $T_{ext}=10^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 51-BCp, 52-BCp, 53-BCp, 54-BCp e 55-BCp).

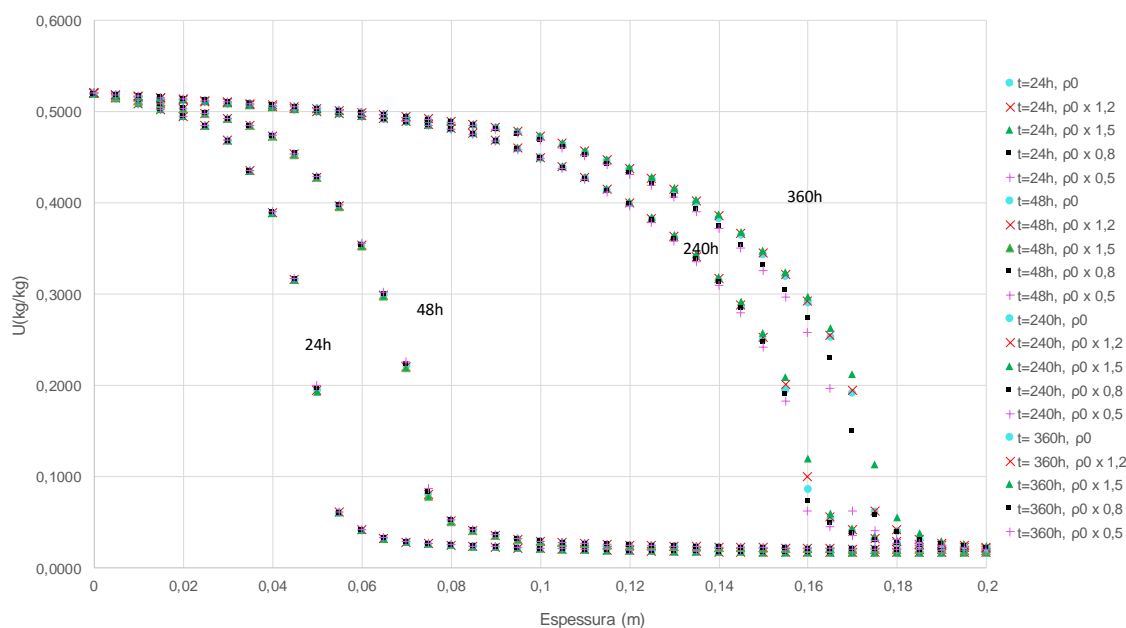


Figura 4 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição face à variação da massa volumica seca do betão celular, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=10\%$  (simulações: 1-BCp, 2-BCp, 3-BCp, 4-BCp e 5-BCp).

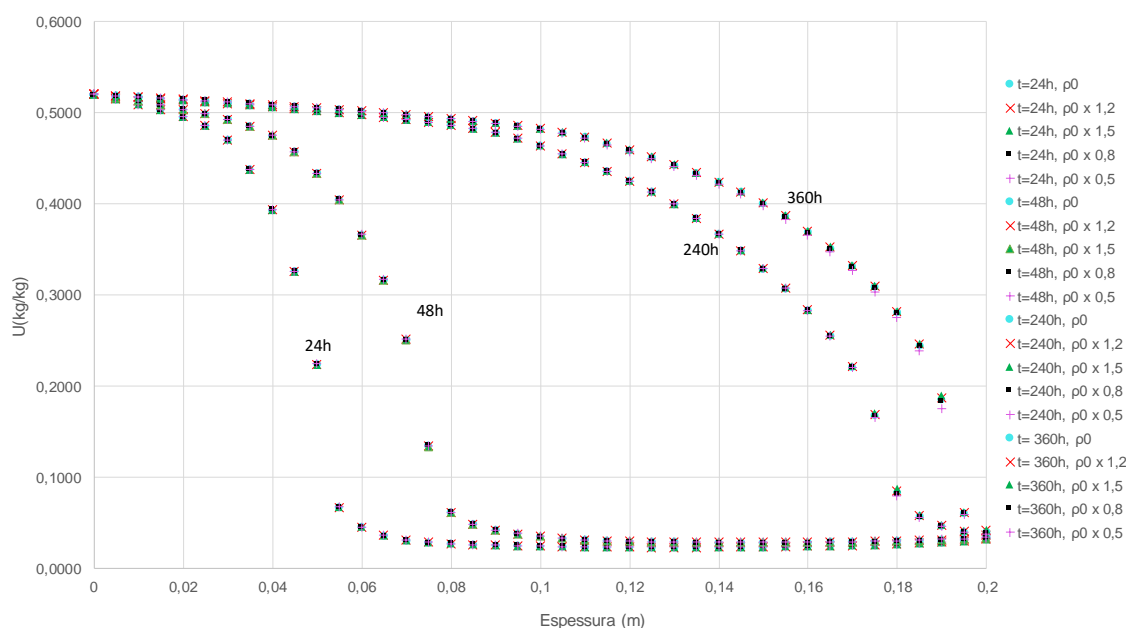


Figura 5 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição face à variação da massa volumica seca do betão celular, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=65\%$  (simulações: 11-BCp, 12-BCp, 13-BCp, 14-BCp e 15-BCp).

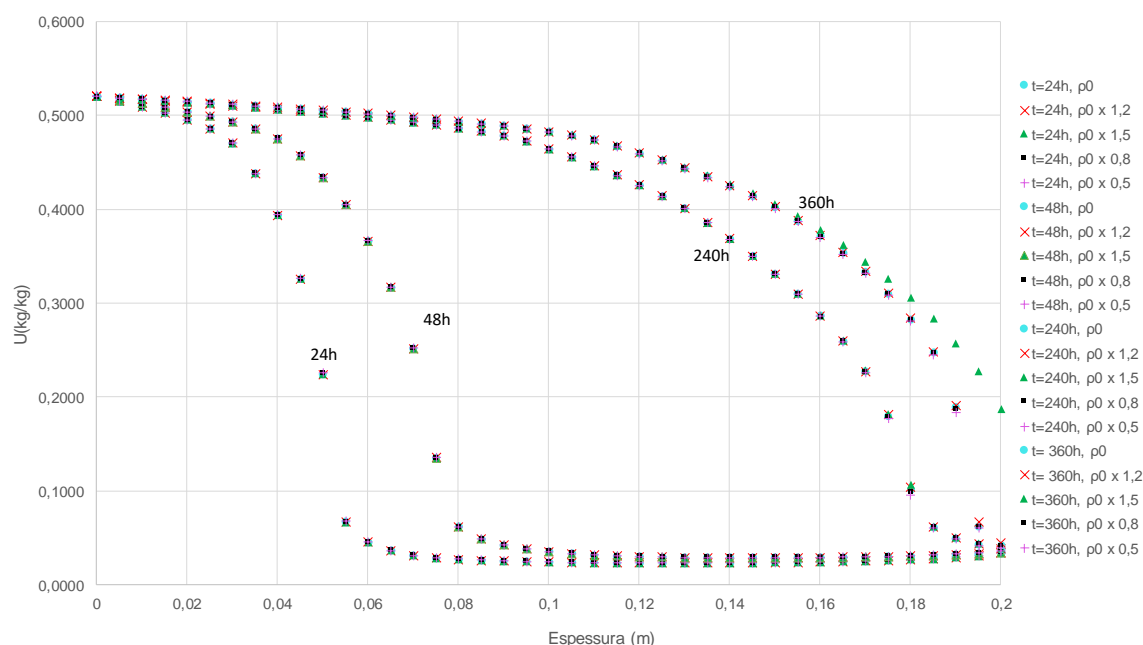


Figura 6 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição face à variação da massa volúmica seca do betão celular, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=70\%$  (simulações: 16-BCp, 17-BCp, 18-BCp, 19-BCp e 20-BCp).

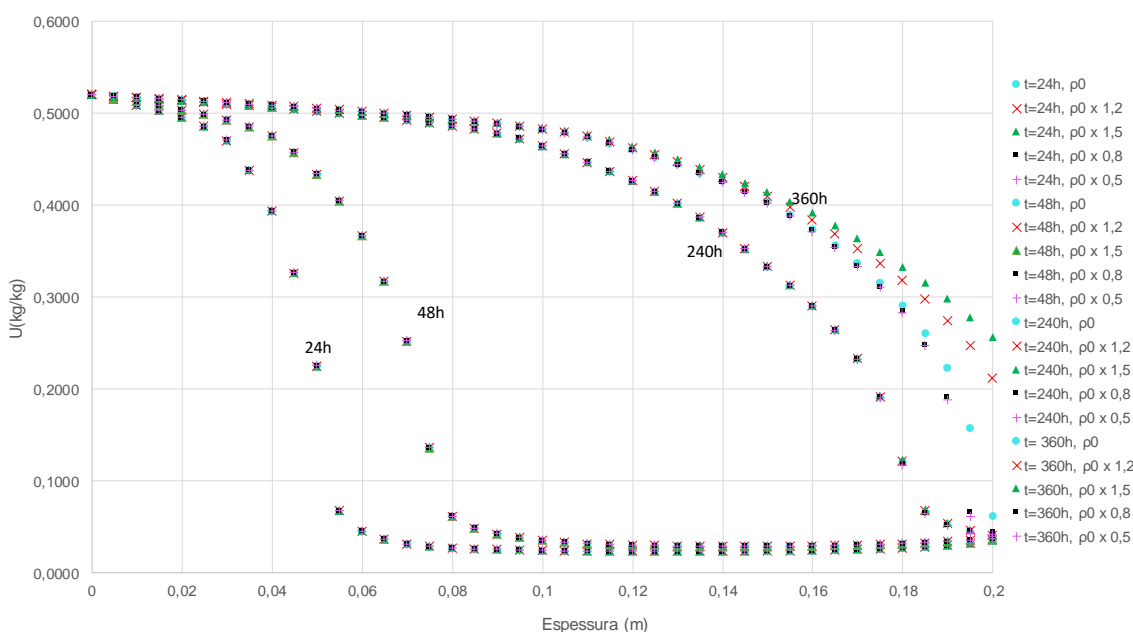


Figura 7 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição face à variação da massa volúmica seca do betão celular, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=75\%$  (simulações: 21-BCp, 22-BCp, 23-BCp, 24-BCp e 25-BCp).

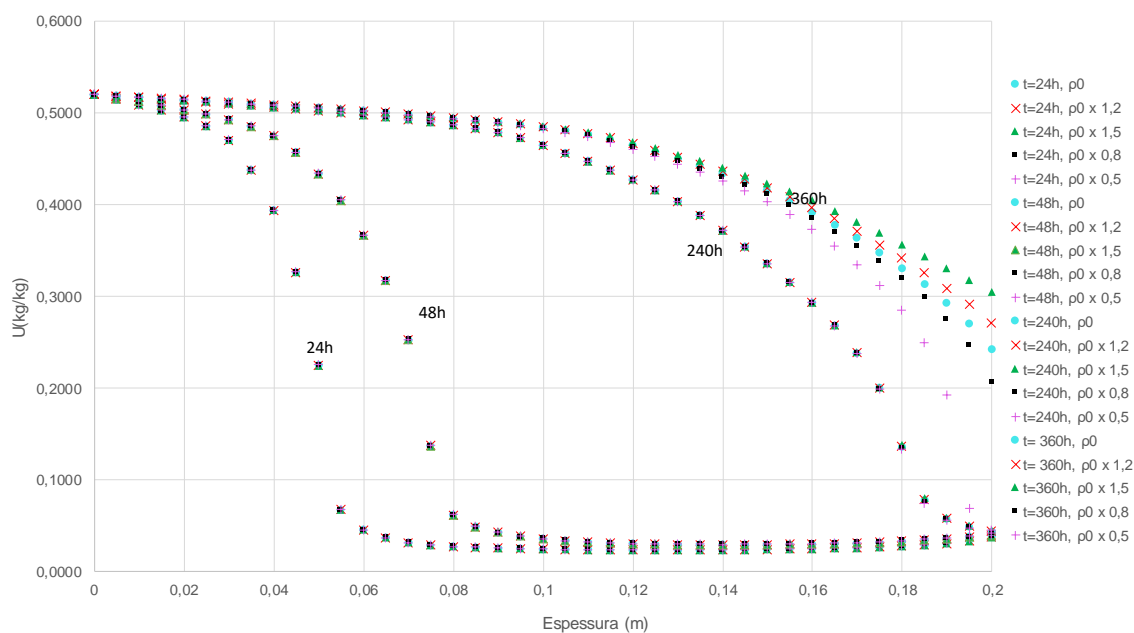


Figura 8 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição face à variação da massa volúmica seca do betão celular, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=80\%$  (simulações: 26-BCp, 27-BCp, 28-BCp, 29-BCp e 30-BCp).

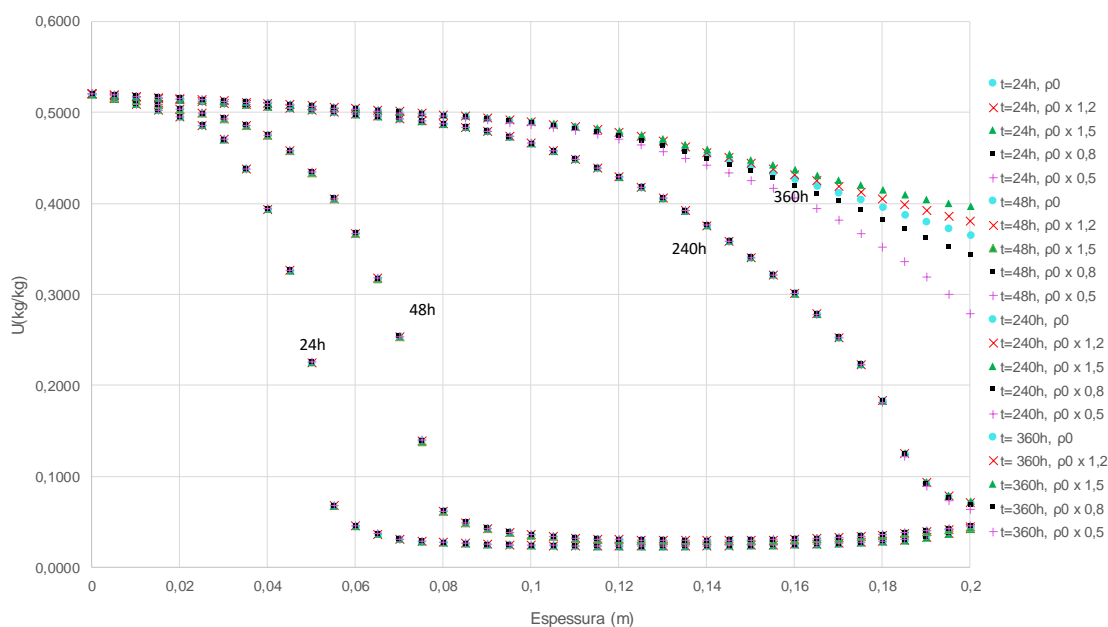


Figura 9 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição face à variação da massa volúmica seca do betão celular, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=90\%$  (simulações: 36-BCp, 37-BCp, 38-BCp, 39-BCp e 40-BCp).

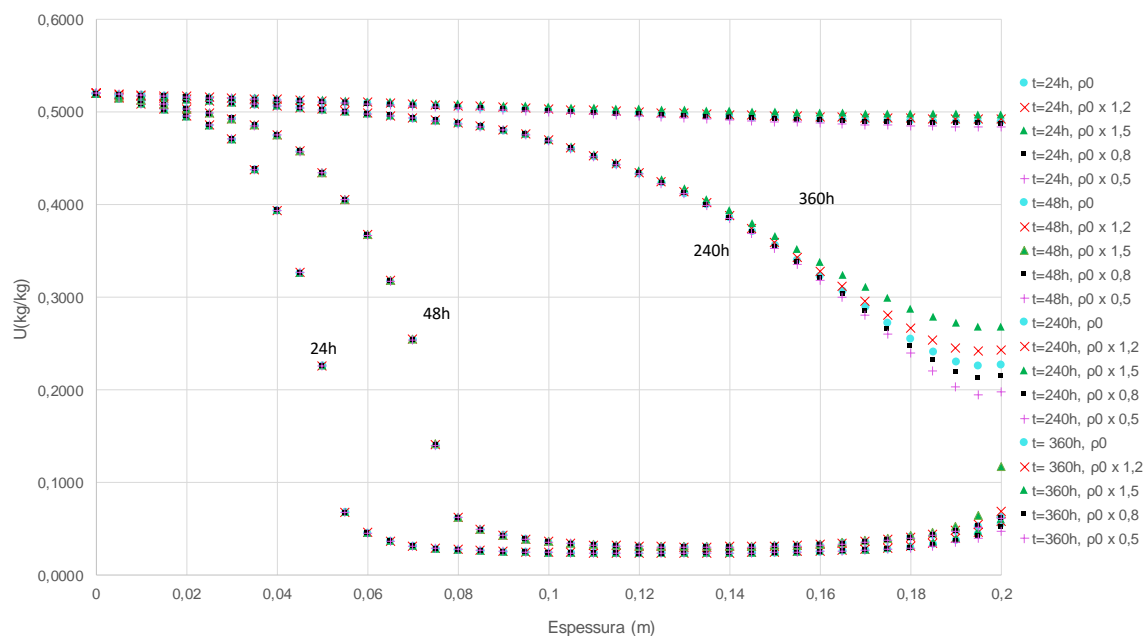


Figura 10 - Variação dos perfis do teor de humidade em embebição face à variação da massa volúmica seca do betão celular, considerando  $T_{\text{ext}}=25^\circ\text{C}$ ,  $HR_{\text{ext}}=100\%$ ,  $T_{\text{int}}=25^\circ\text{C}$  e  $HR_{\text{int}}=100\%$  (simulações: 46-BCp, 47-BCp, 48-BCp, 49-BCp e 50-BCp).



## **Anexo 7**

SIMULAÇÕES PARA A ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO CALOR ESPECÍFICO,  $c_0$

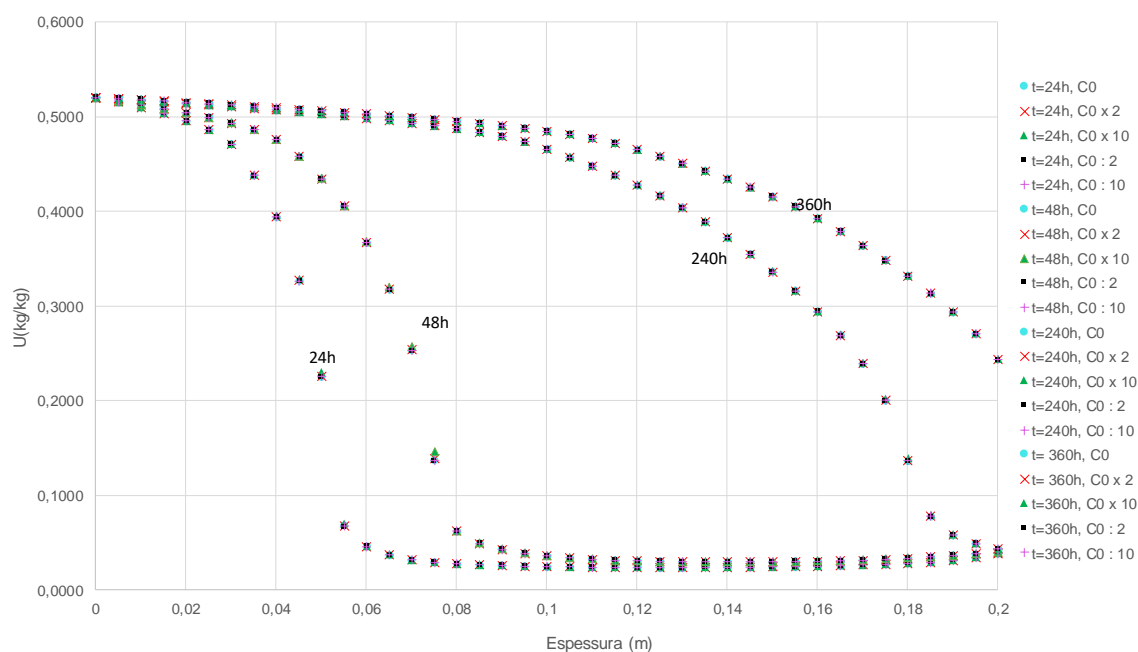


Figura 11 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição face à variação do calor específico seco do betão celular, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=80\%$  (simulações: 6-BCc, 7-BCc, 8-BCc, 9-BCc e 10-BCc).

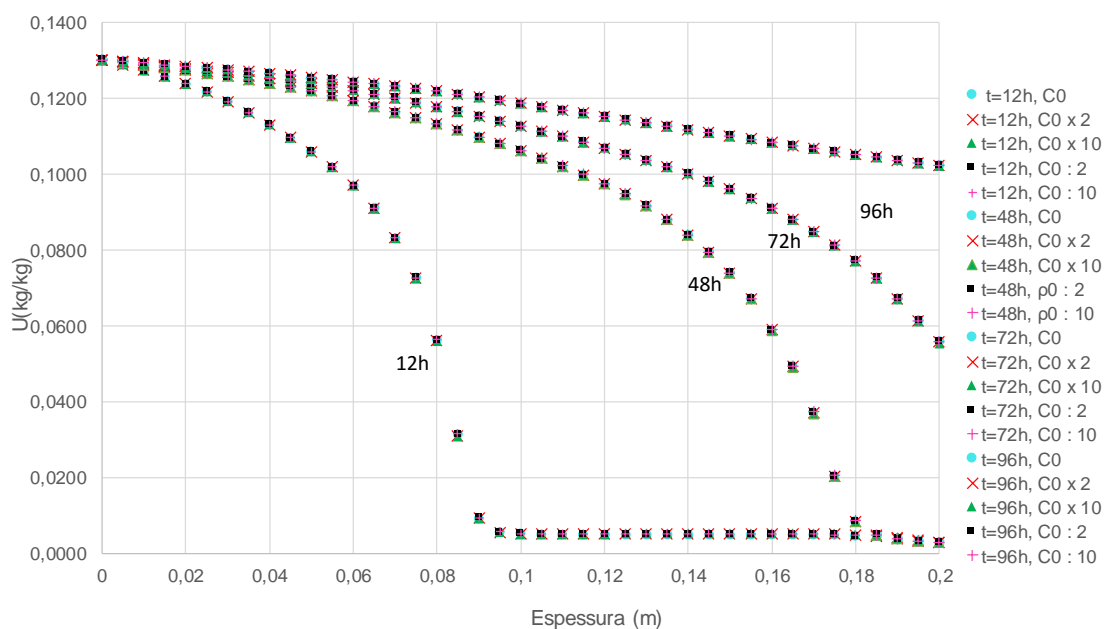


Figura 12 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face à variação do calor específico seco do barro vermelho, considerando  $T_{ext}=10^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 6-BVc, 7-BVc, 8-BVc, 9-BVc e 10-BVc).

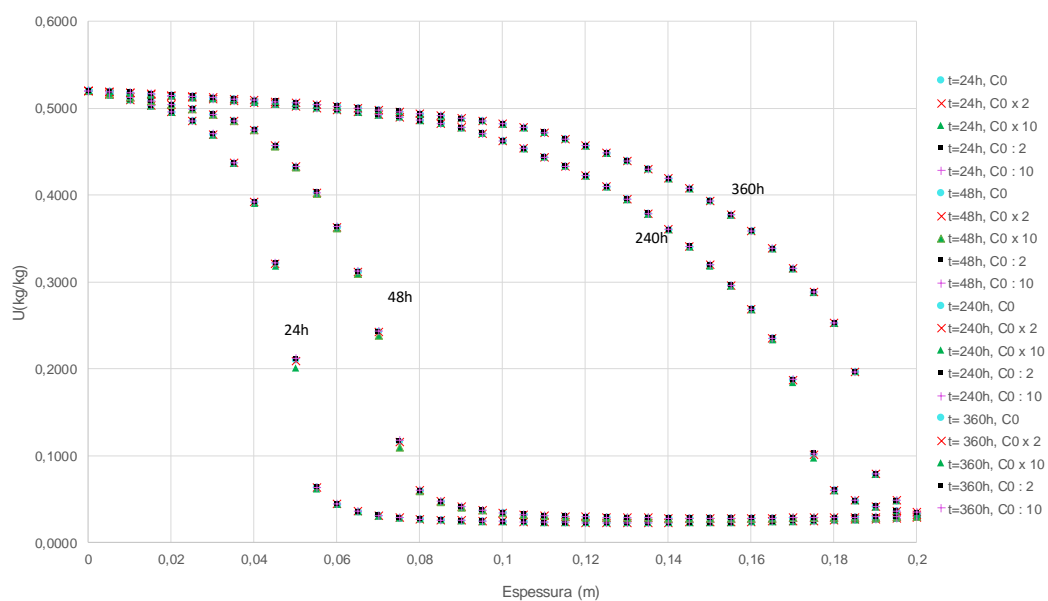


Figura 13 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição face à variação do calor específico seco do betão celular, considerando  $T_{ext}=10^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 11-BCc, 12-BCc, 13-BCc, 14-BCc e 15-BCc).



## **Anexo 8**

### **SIMULAÇÕES PARA A ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA CURVA HIGROSCÓPICA**

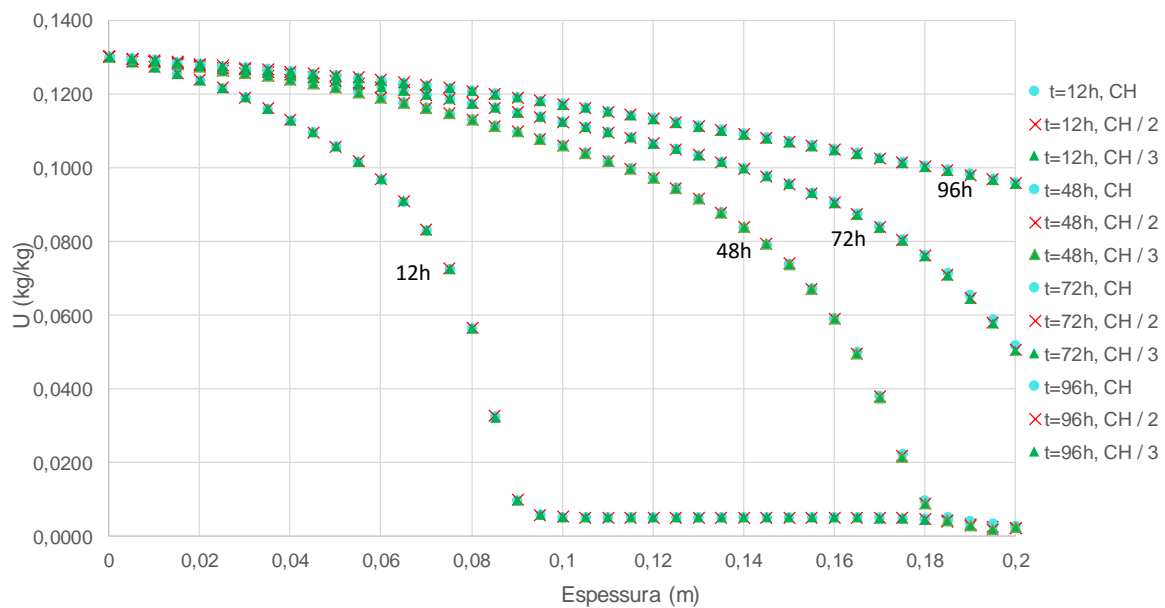


Figura 14 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição face à diminuição da higroscopicidade do barro vermelho, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 6-BVch e 7-BVch).

## **Anexo 9**

SIMULAÇÕES PARA A ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA DIFUSIVIDADE HÍGRICA,  $D_w$

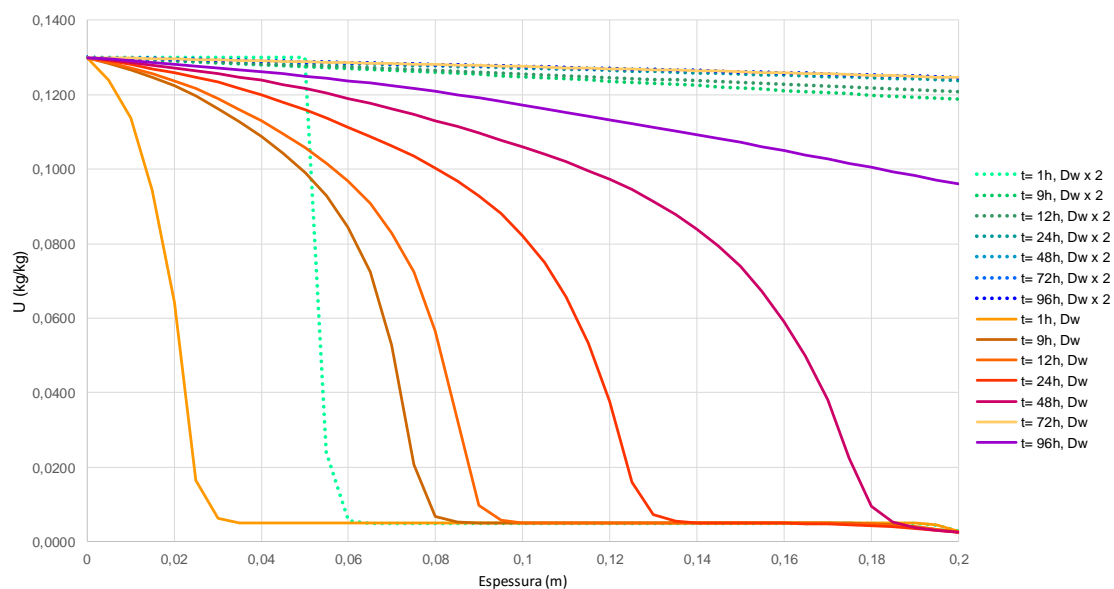


Figura 15 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face ao aumento da difusividade hídrica, no barro vermelho, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}C$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}C$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 5-BVdw e 6-BVdw). Problemas de instabilidade no programa (K.O.).

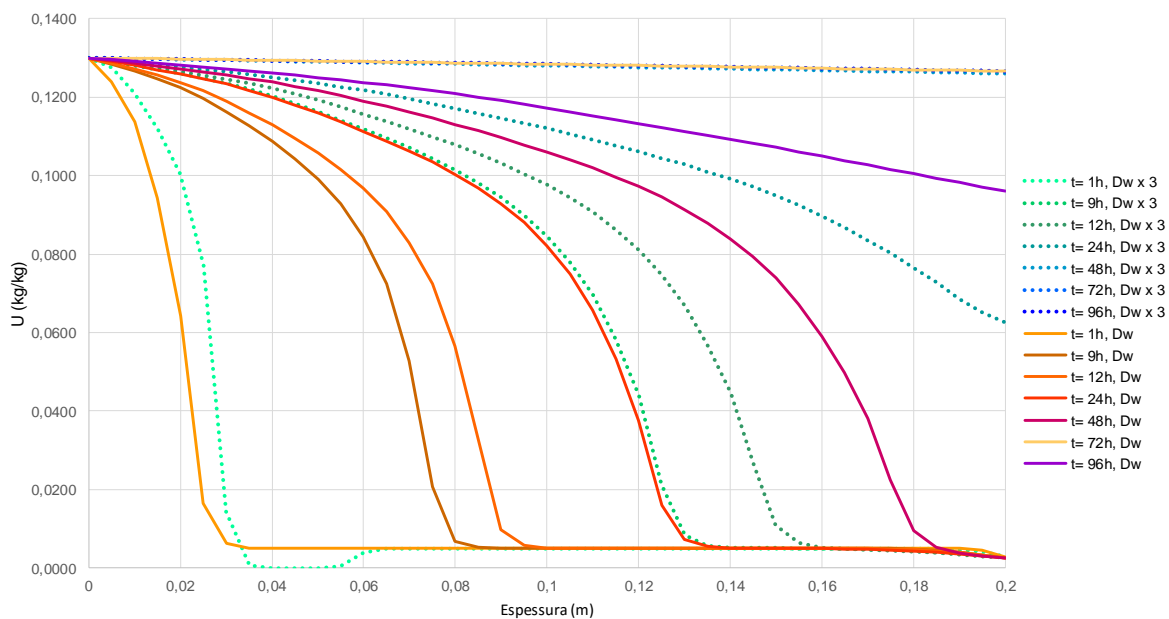


Figura 16 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face ao aumento da difusividade hídrica, no barro vermelho, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}C$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}C$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 4-BVdw e 6-BVdw). Problemas de instabilidade no programa (K.O.).



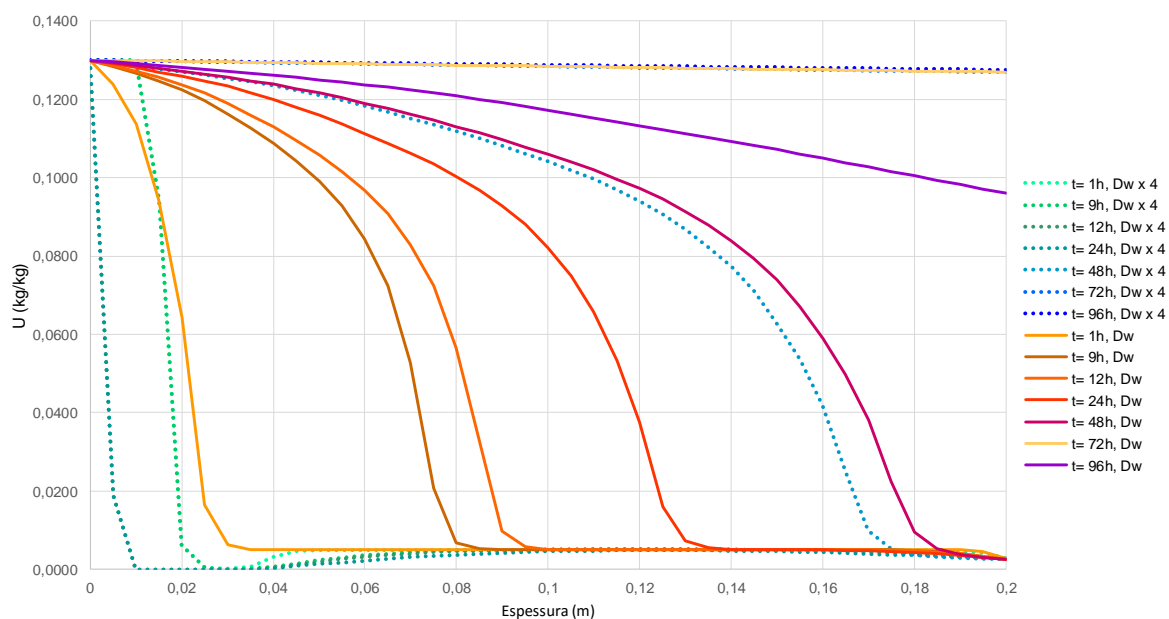


Figura 17 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face ao aumento da difusividade hídrica, no barro vermelho, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 3-BVdw e **6-BVdw**). Problemas de instabilidade no programa (K.O.).

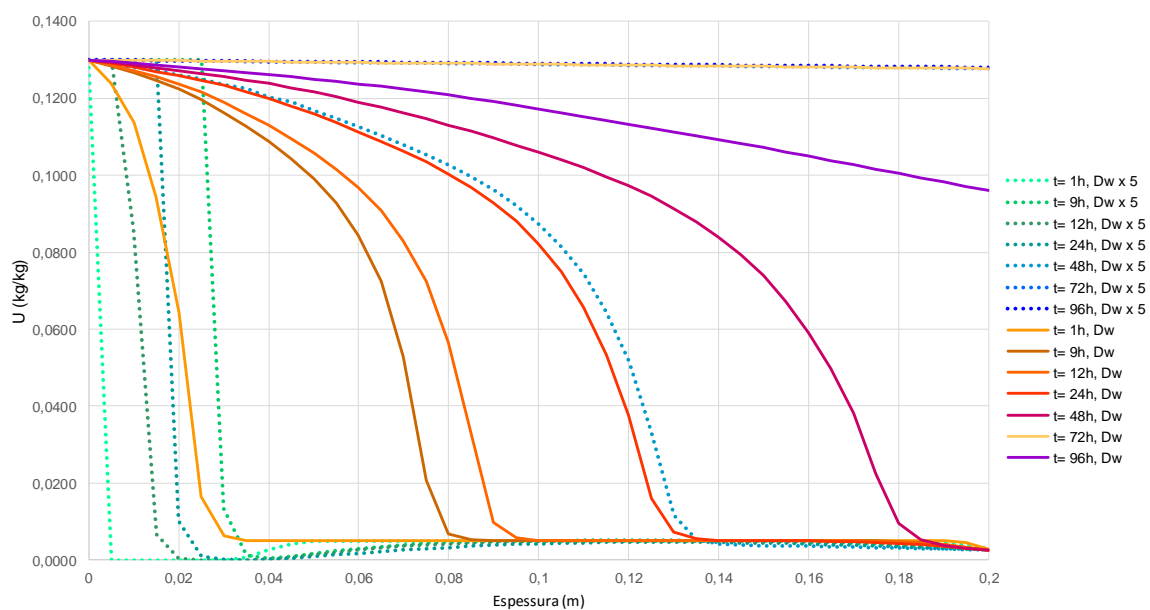


Figura 18 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face ao aumento da difusividade hídrica, no barro vermelho, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 2-BVdw e **6-BVdw**). Problemas de instabilidade no programa (K.O.).

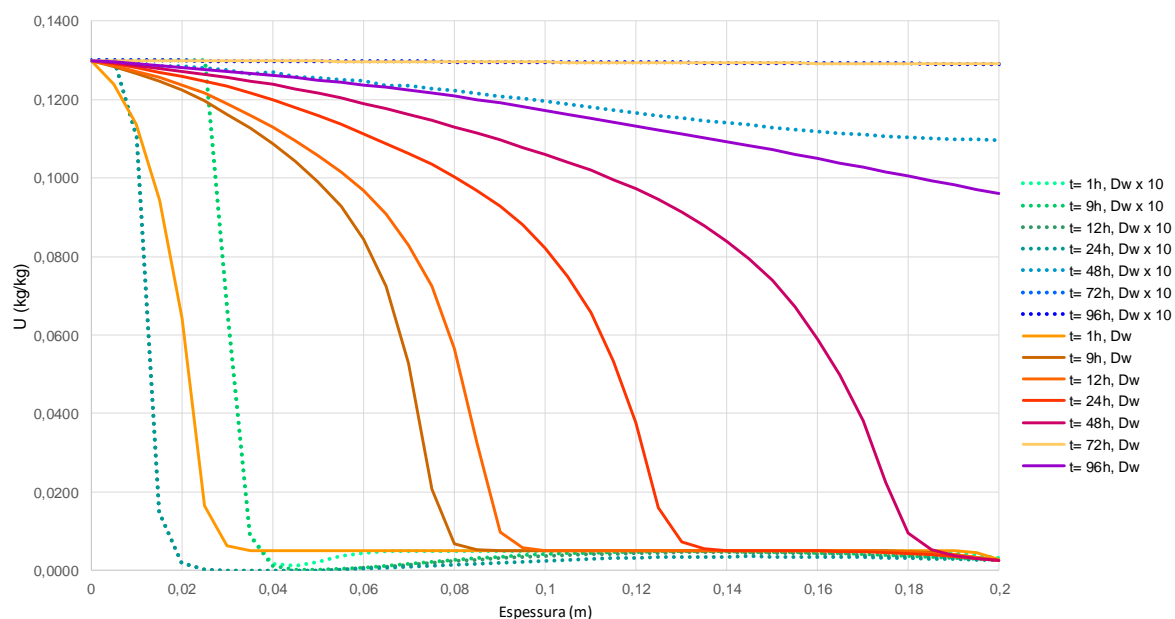


Figura 19 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face ao aumento da difusividade hídrica, no barro vermelho, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}C$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}C$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 1-BVdw e 6-BVdw). Problemas de instabilidade no programa (K.O.).

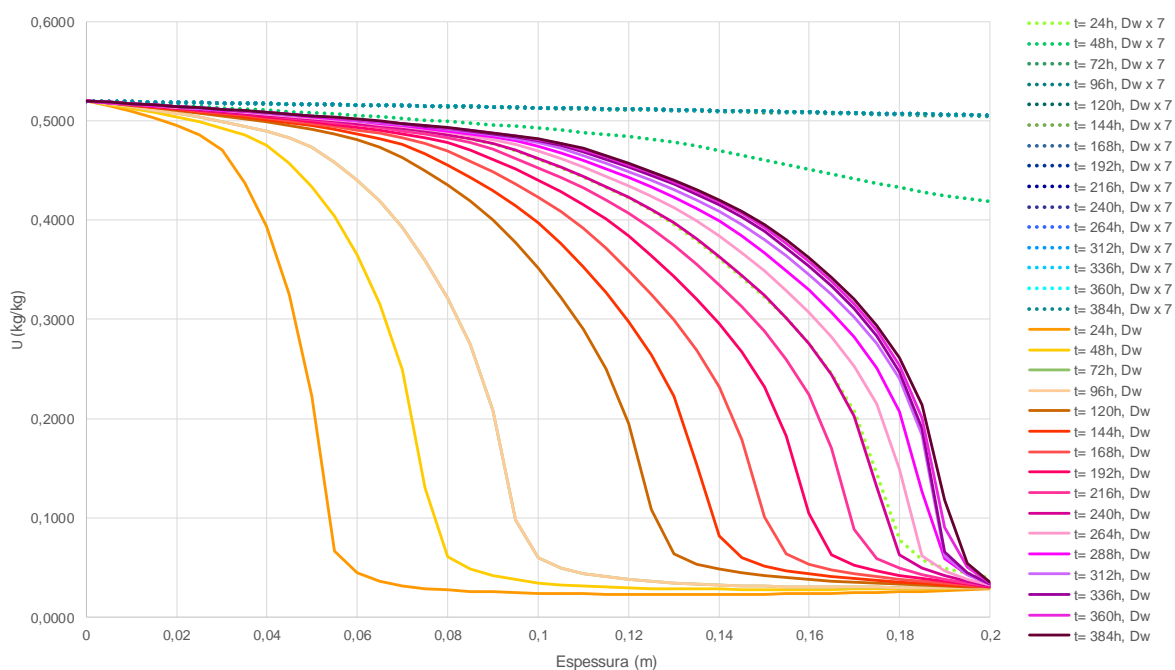


Figura 20 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face ao aumento da difusividade hídrica, no betão celular, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}C$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}C$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 2-BCdw e 8-BCdw). Problemas de instabilidade no programa (K.O.).

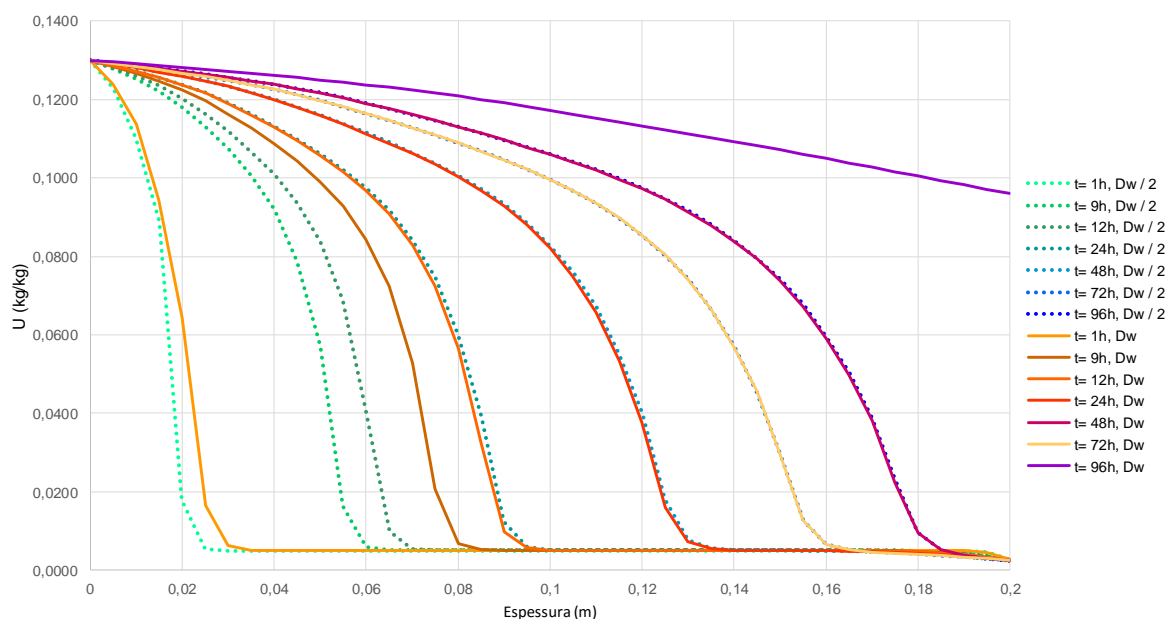


Figura 21 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face à diminuição da difusividade hídrica, no barro vermelho, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 7-BVdw e **6-BVdw**).

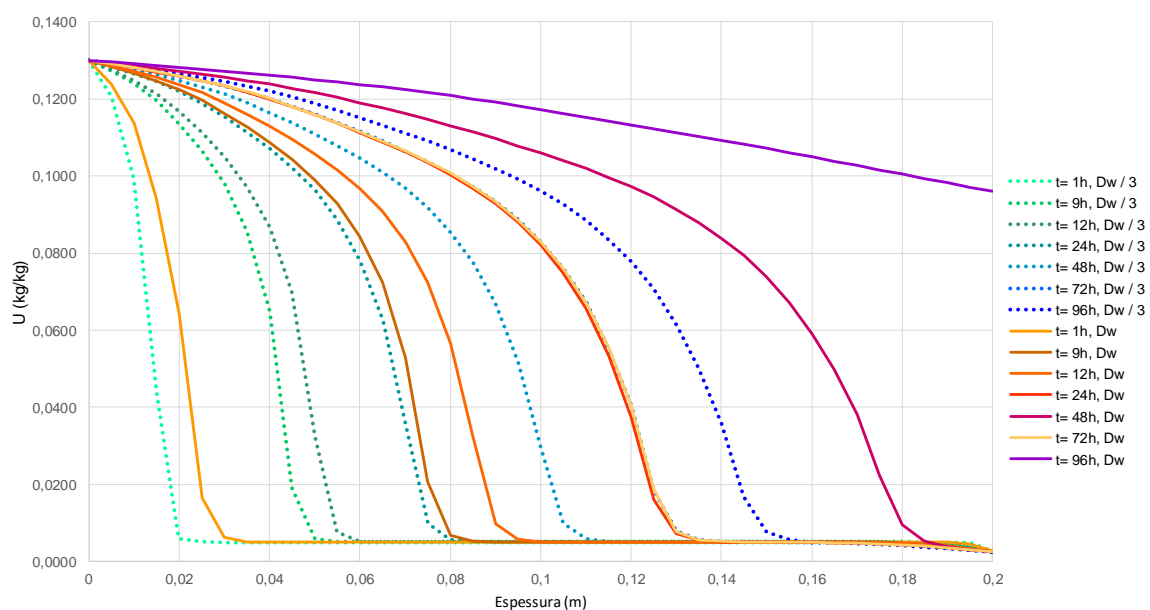


Figura 22 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face à diminuição da difusividade hídrica, no barro vermelho considerando  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 8-BVdw e **6-BVdw**).

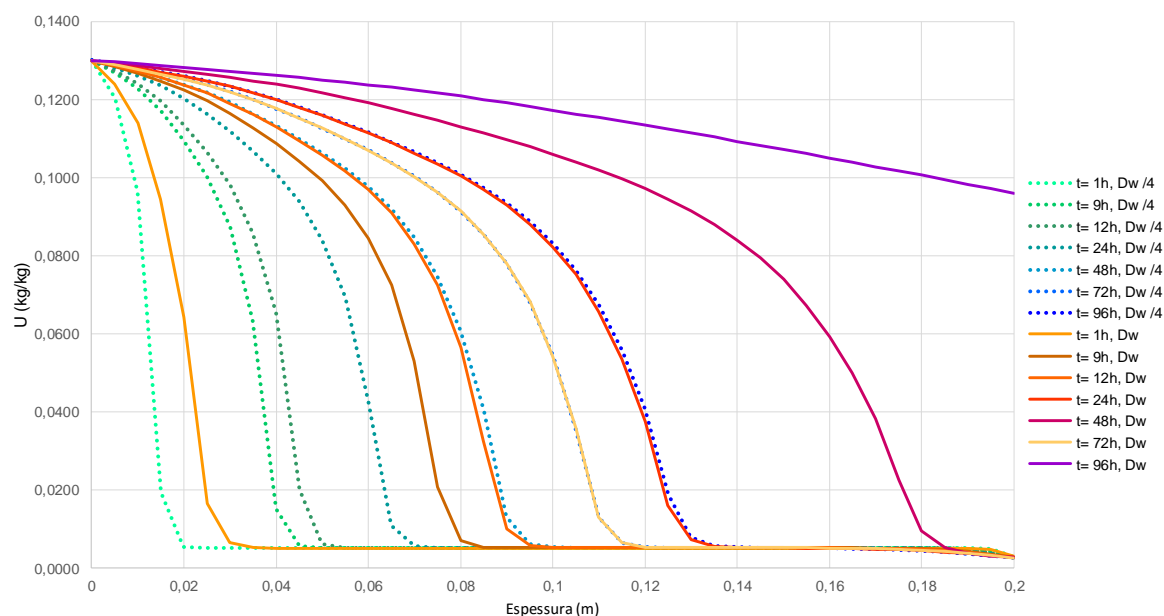


Figura 23 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face à diminuição da difusividade hídrica, no barro vermelho, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 9-BVdw e 6-BVdw).

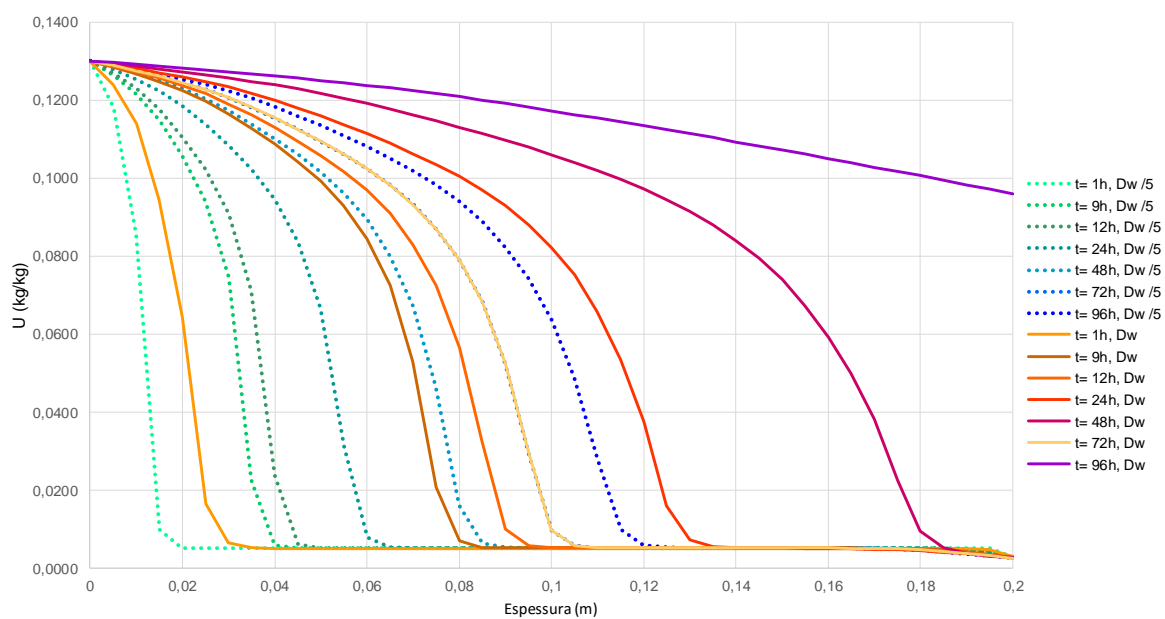


Figura 24 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face à diminuição da difusividade hídrica, no barro vermelho considerando  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 10-BVdw e 6-BVdw).

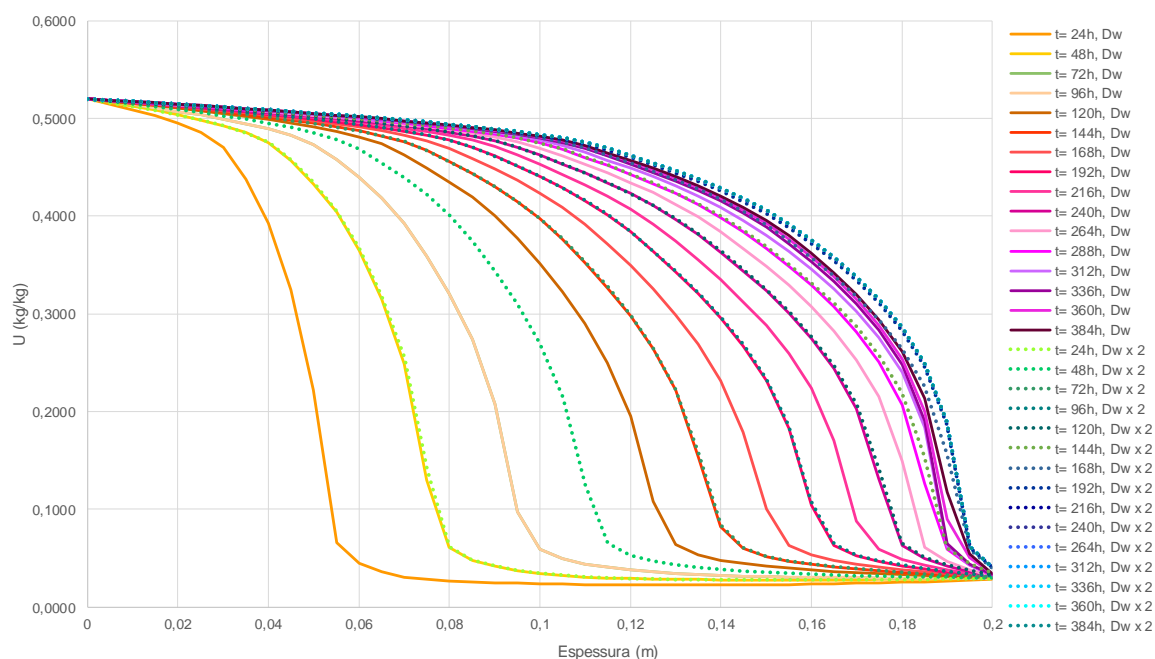


Figura 25 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face ao aumento da difusividade hídrica, no betão celular, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 7-BCdw e 8-BCdw).

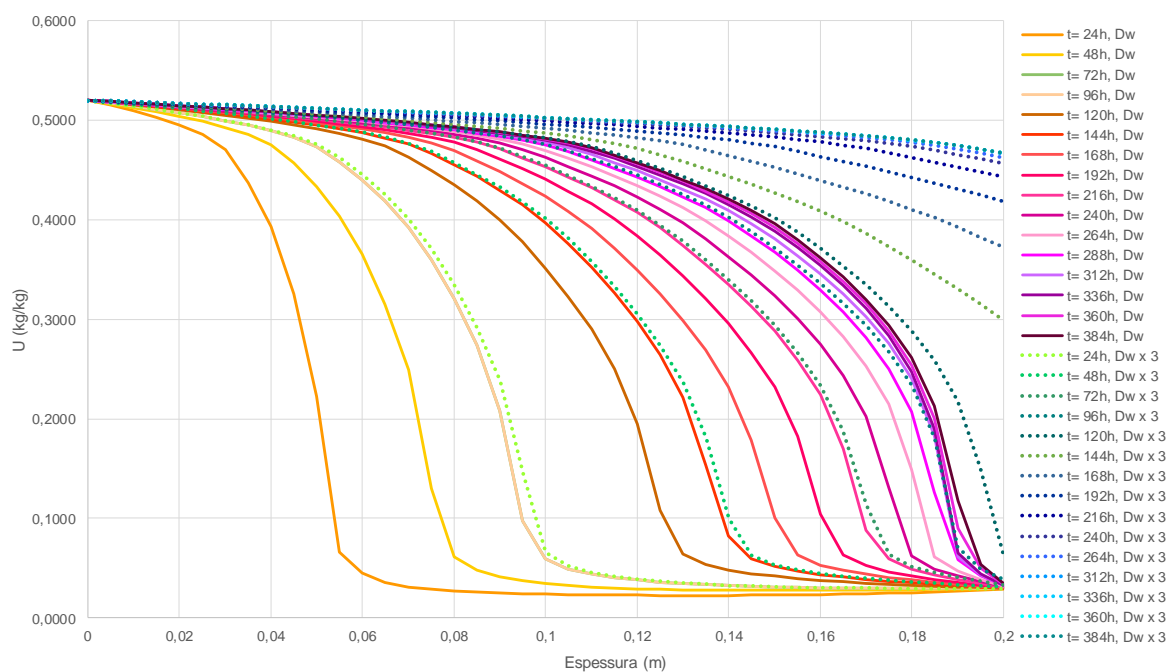


Figura 26 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face ao aumento da difusividade hídrica, no betão celular, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 6-BCdw e 8-BCdw).

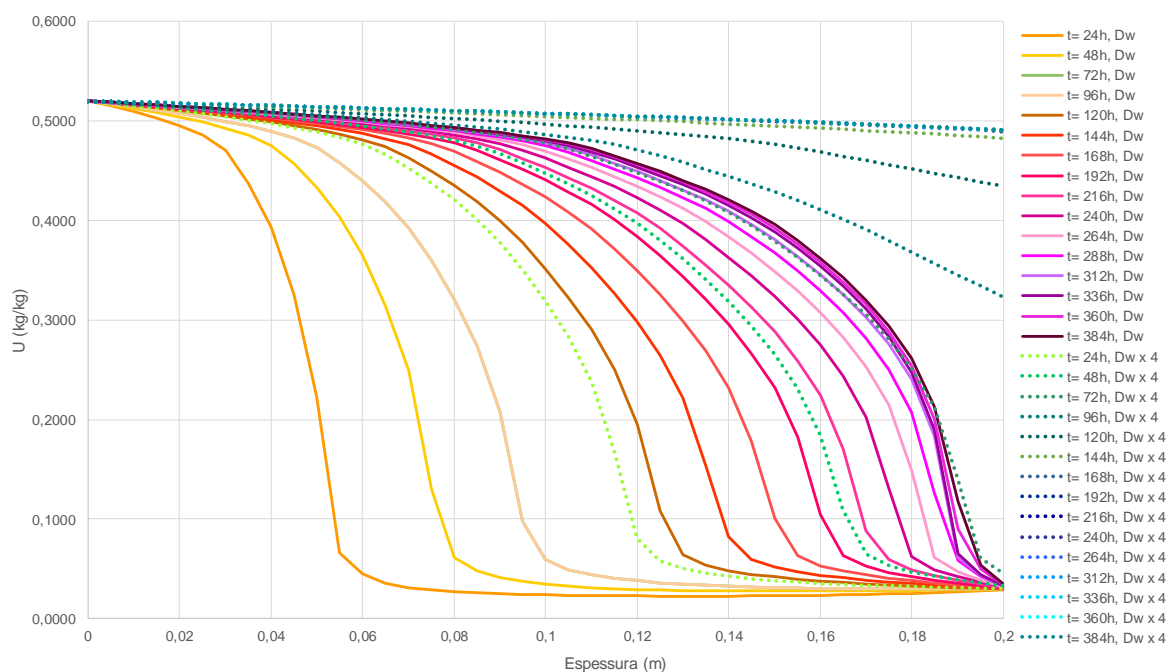


Figura 27 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face ao aumento da difusividade hídrica, no betão celular, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 5-BCdw e 8-BCdw).

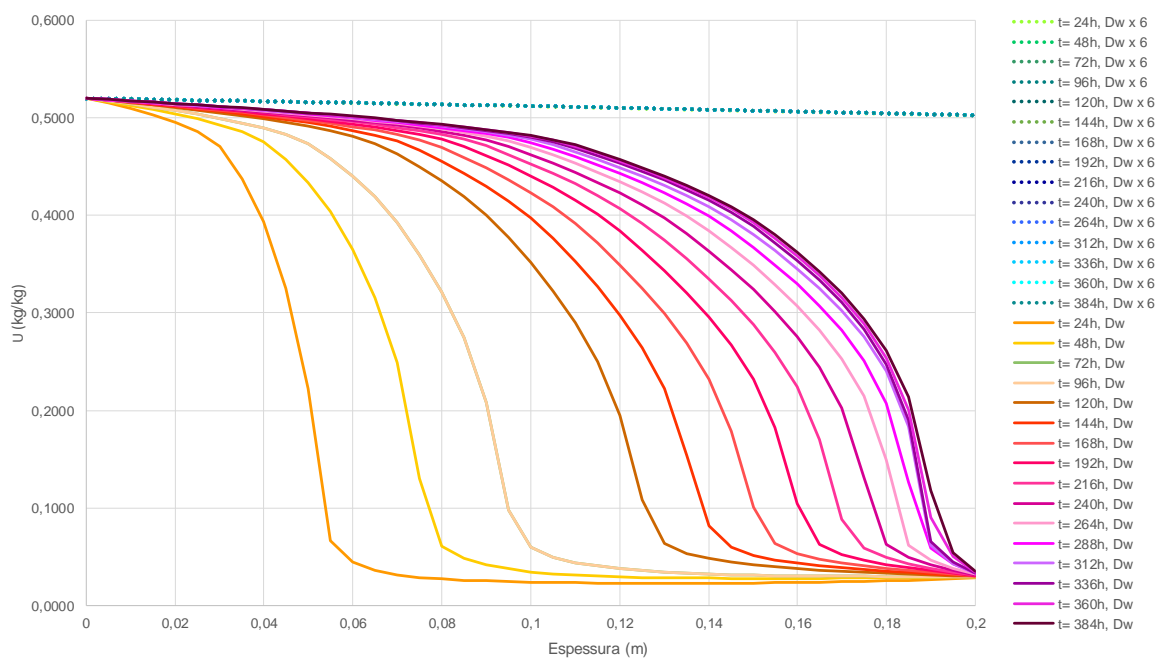


Figura 28 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face ao aumento da difusividade hídrica, no betão celular, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 3-BCdw e 8-BCdw).

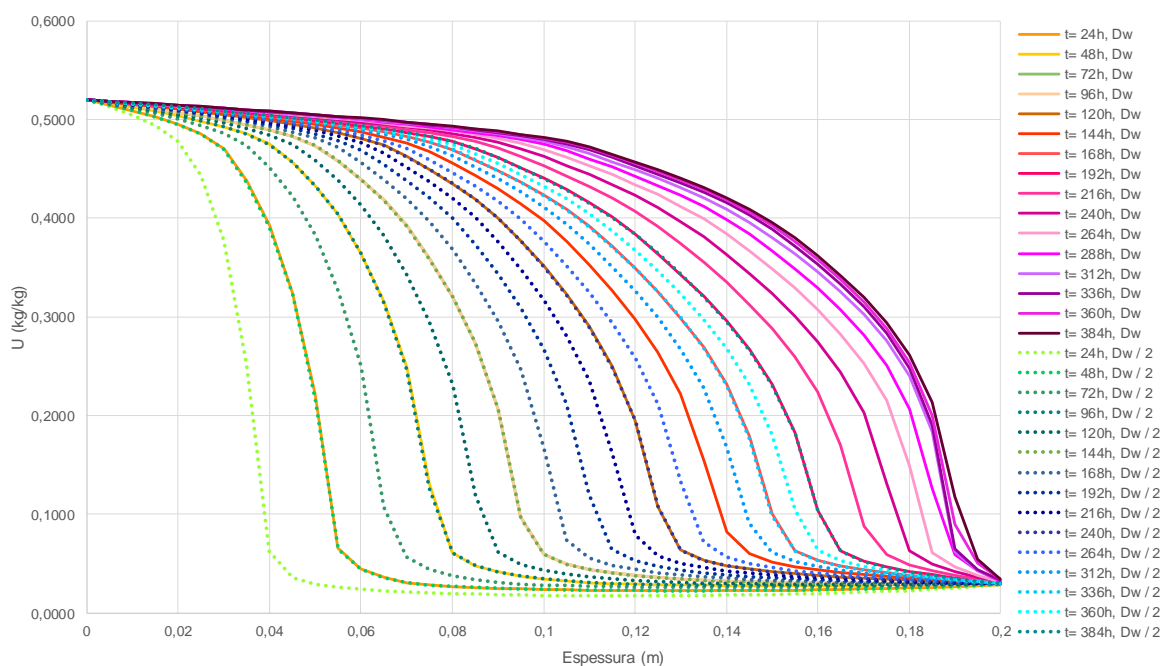


Figura 29 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face à diminuição da difusividade hídrica no betão celular, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}C$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}C$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 9-BCdw e 8-BCdw).

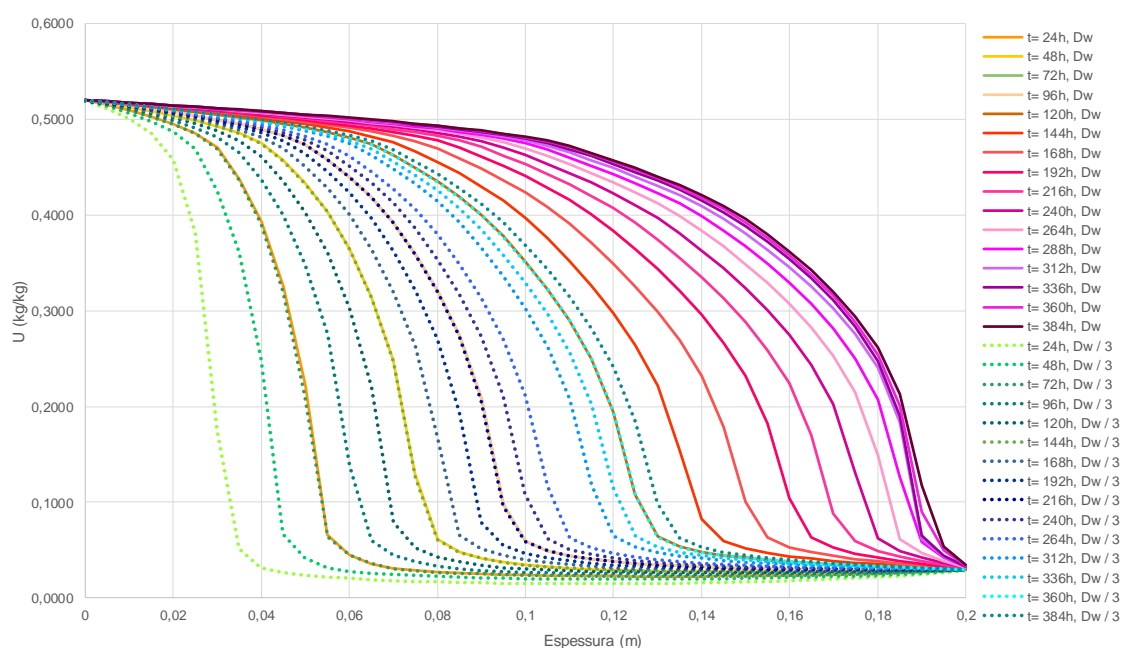


Figura 30 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face à diminuição da difusividade hídrica no betão celular, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}C$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}C$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 10-BCdw e 8-BCdw).



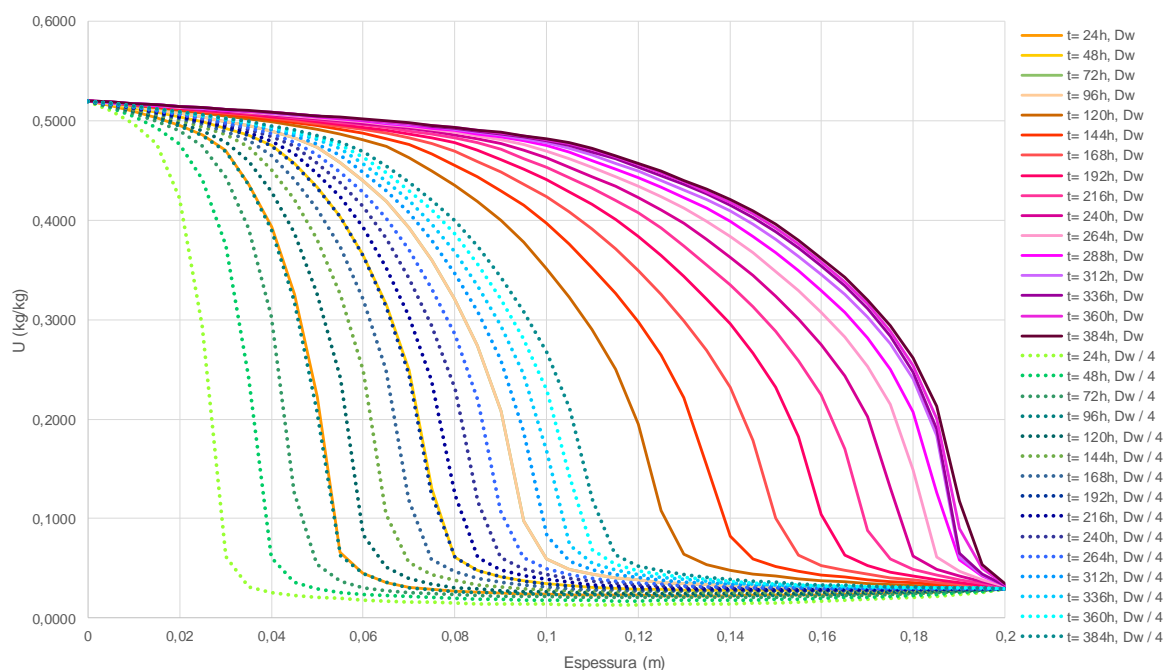


Figura 31 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face à diminuição da difusividade hídrica no betão celular, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 11-BCdw e 8-BCdw).

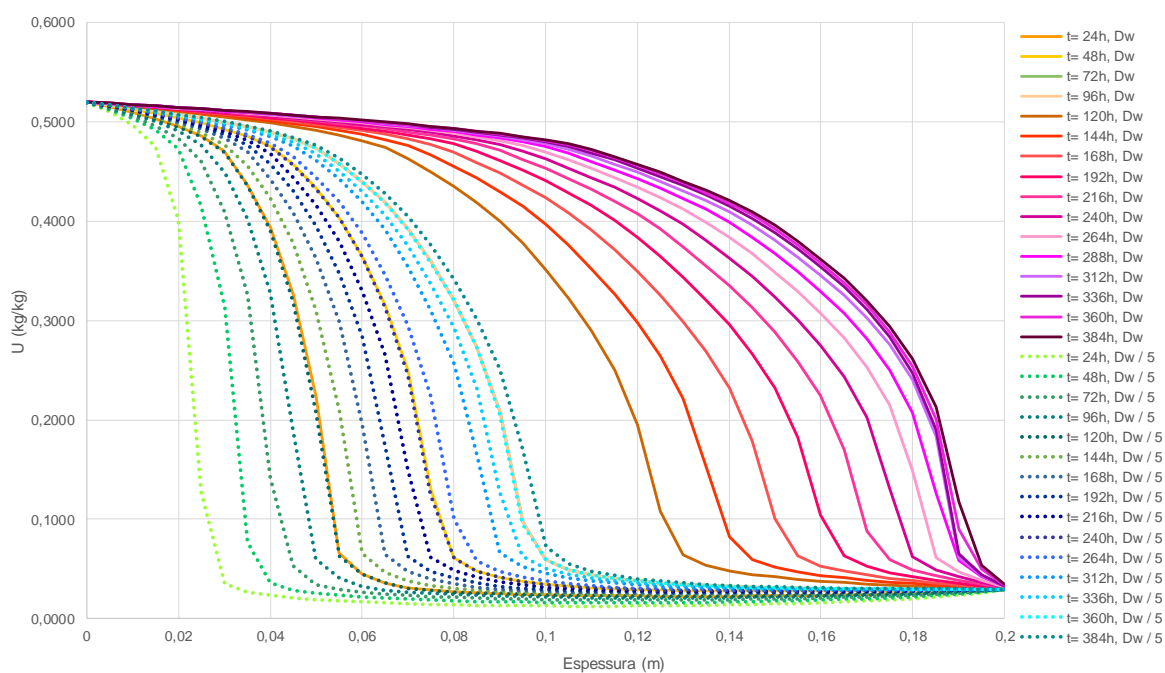


Figura 32 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face à diminuição da difusividade hídrica no betão celular, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 12-BCdw e 8-BCdw).



## **Anexo 10**

SIMULAÇÕES PARA A ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA DIFUSIVIDADE HIGROTÉRMICA,  $D_T$

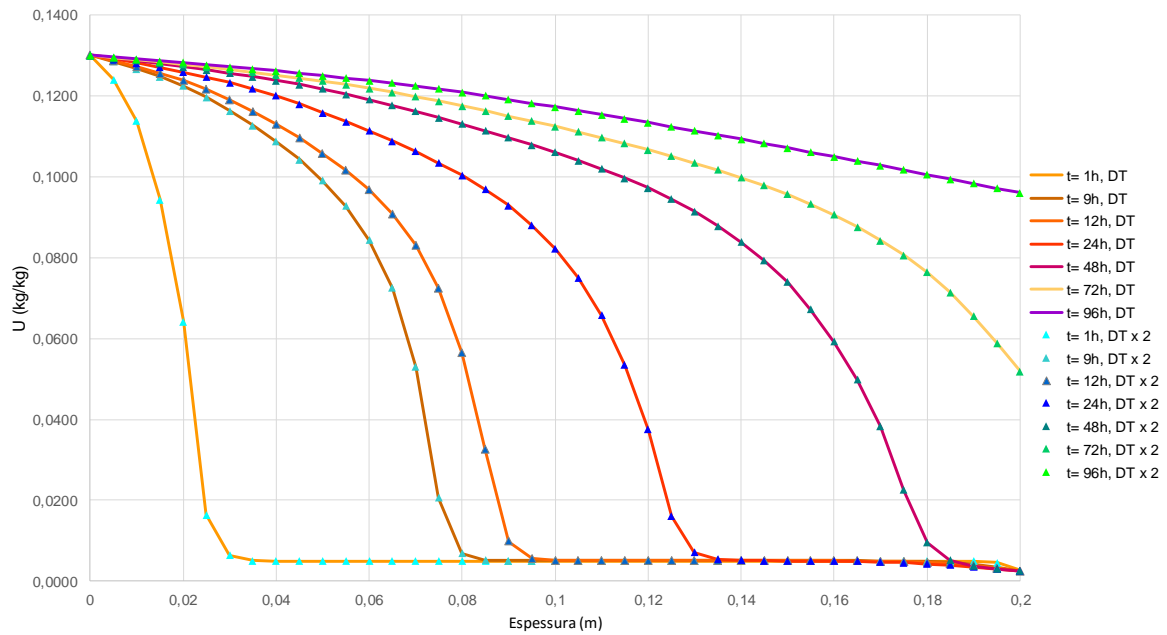


Figura 33 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face ao aumento da difusividade higrotérmica no barro vermelho, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 11-BVdt e 12-BVdt).

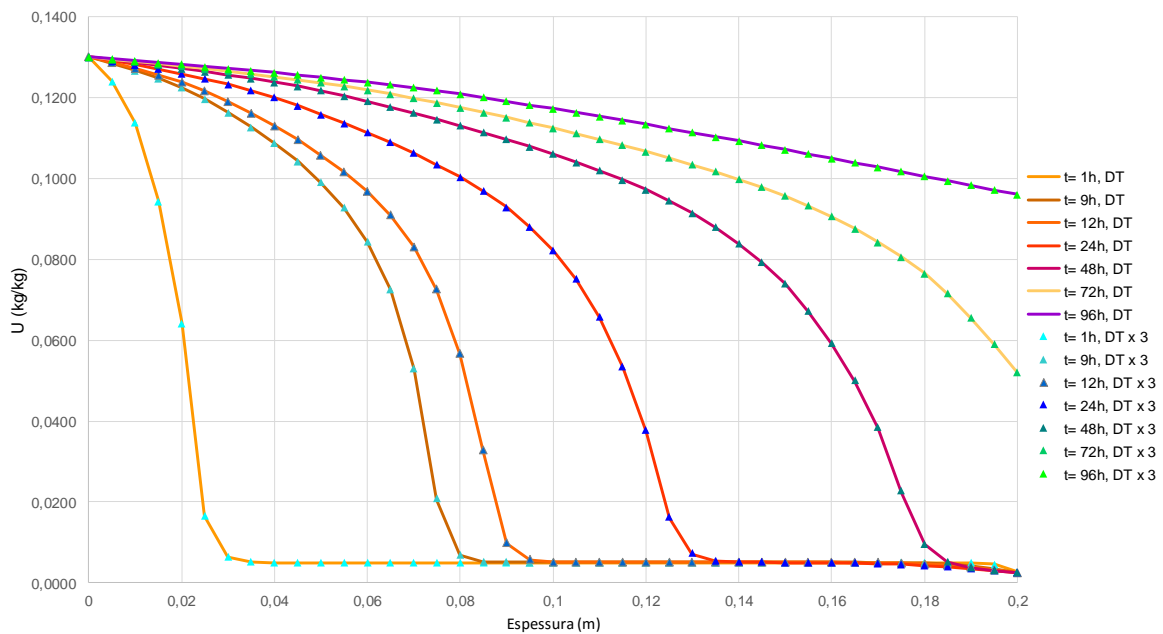


Figura 34 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face ao aumento da difusividade higrotérmica no betão celular, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 10-BVdt e 12-BVdt).

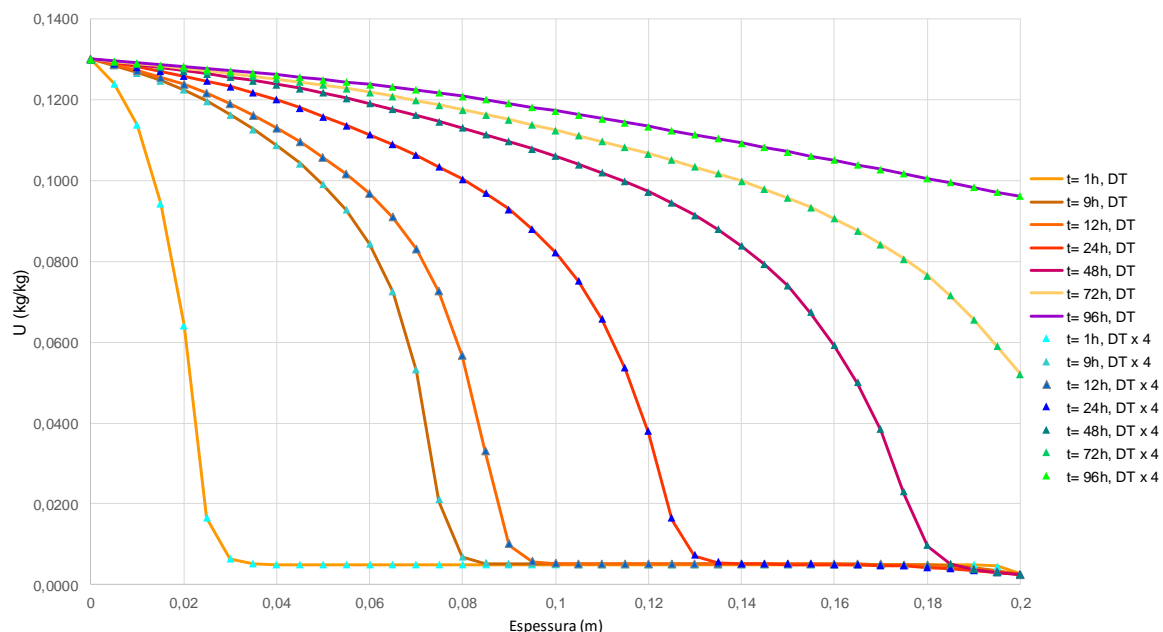


Figura 35 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face ao aumento da difusividade higratérmica no barro vermelho, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}C$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}C$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 9-BVdt e 12-BVdt).

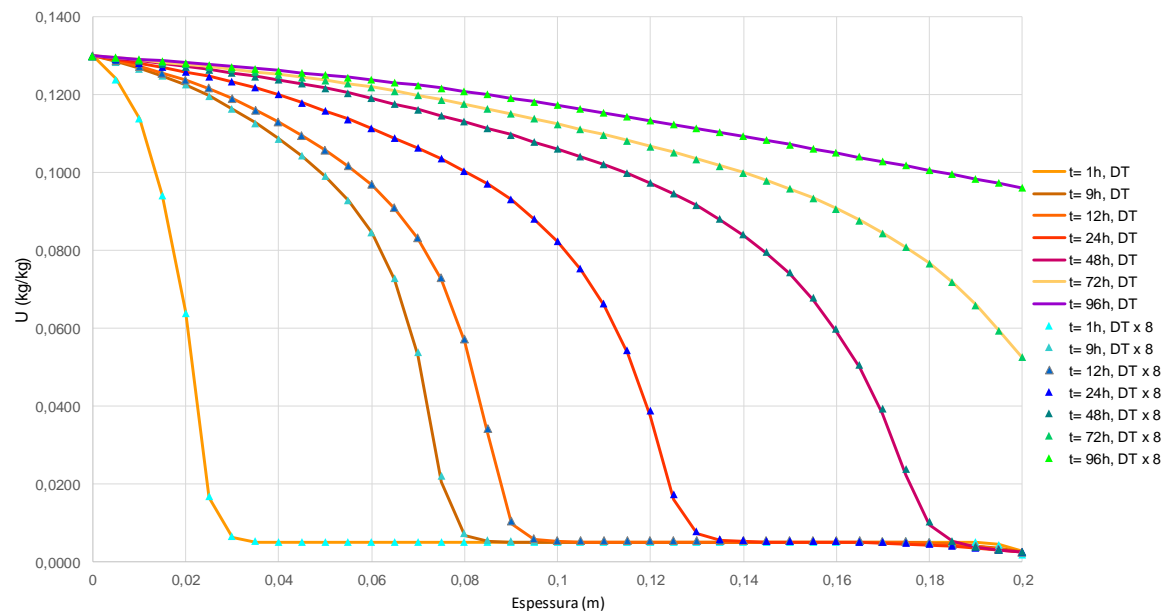


Figura 36 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face ao aumento da difusividade higratérmica no betão celular, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}C$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}C$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 8-BVdt e 12-BVdt).

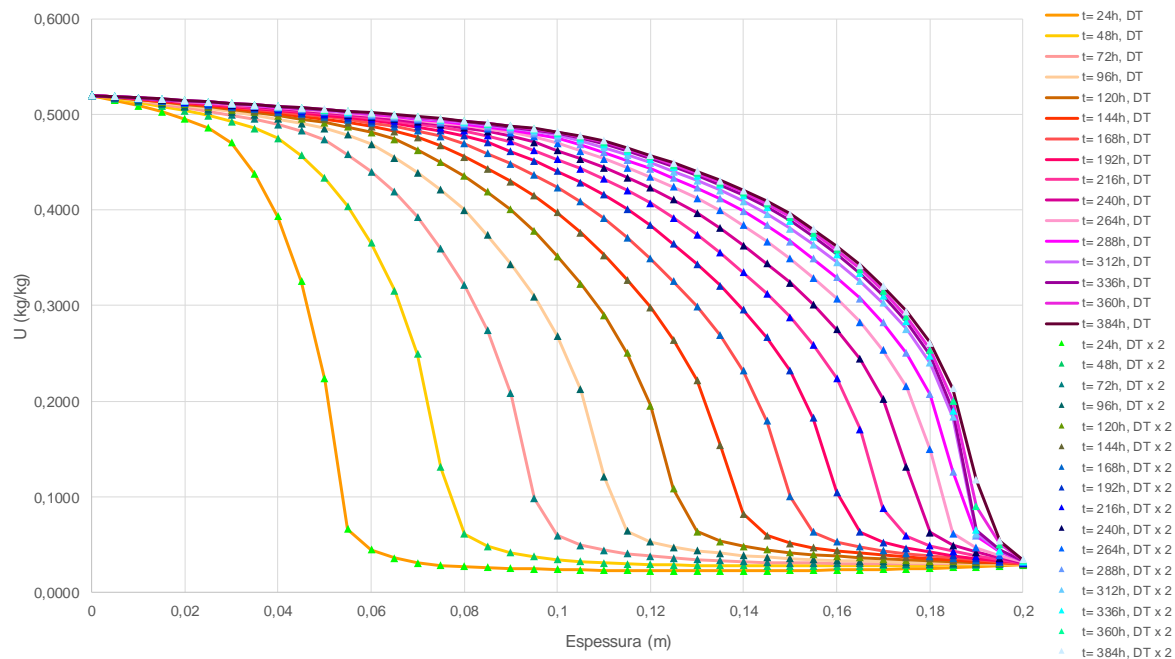


Figura 37 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face ao aumento da difusividade higrotérmica no betão celular, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 8-BCdt e 9-BCdt).

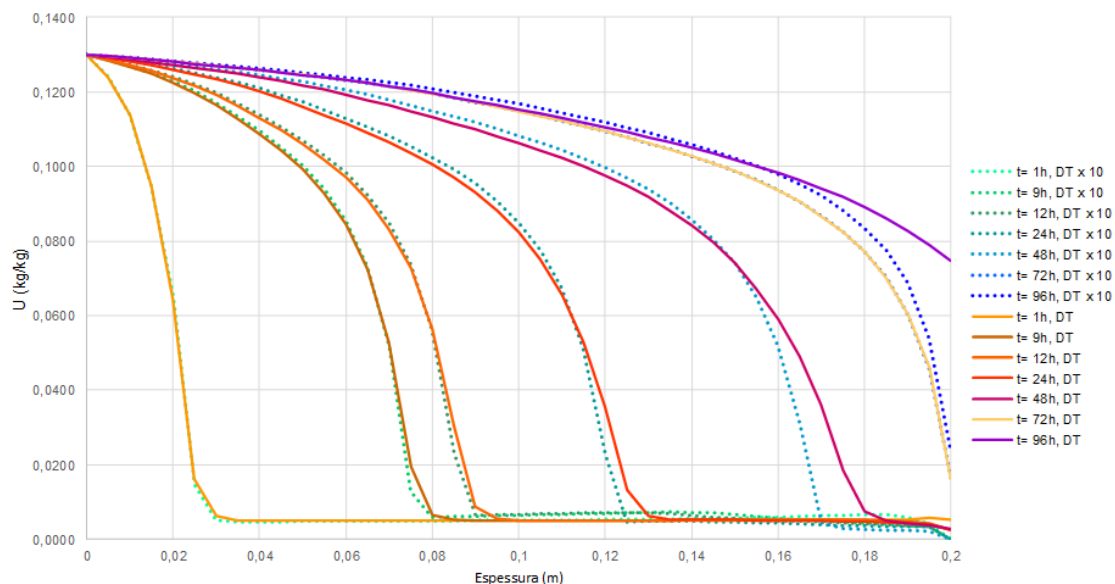


Figura 38 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face ao aumento da difusividade higrotérmica no barro vermelho, considerando  $T_{ext}=10^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=50^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 1-BVdt e 4-BVdt).

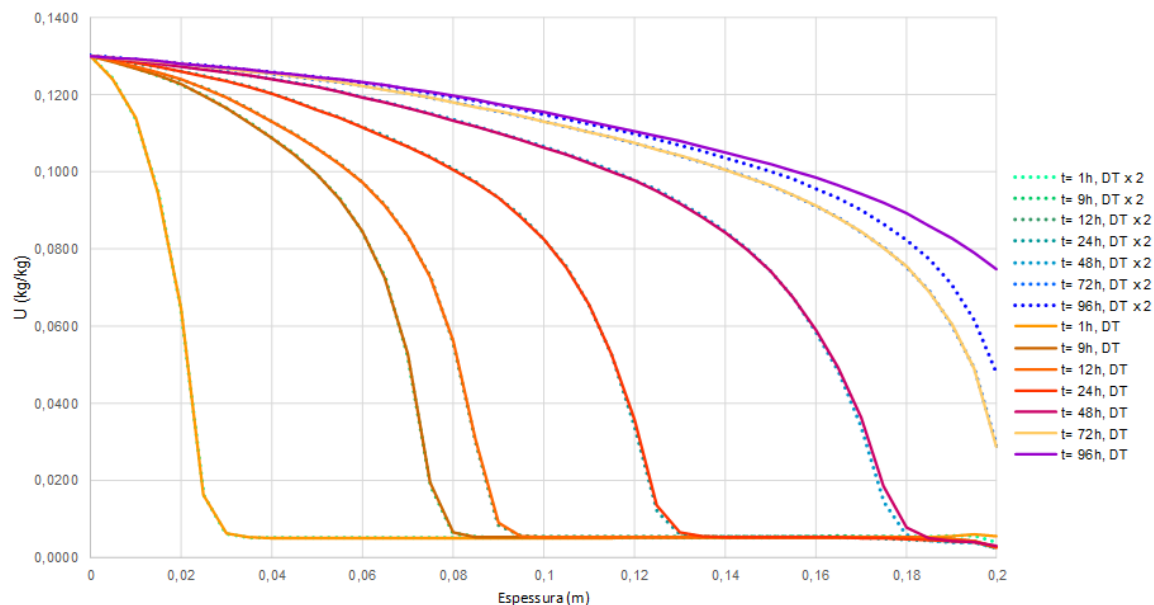


Figura 39 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face ao aumento da difusividade higrotérmica no barro vermelho, considerando  $T_{ext}=10^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=50^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 3-BVdt e 4-BVdt).

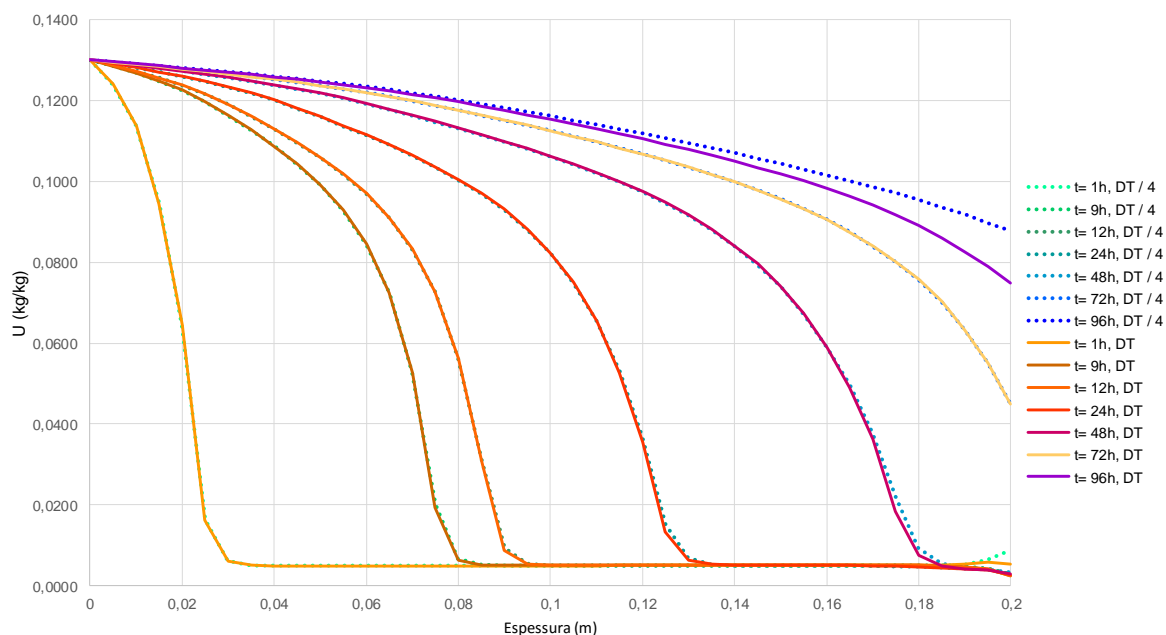


Figura 40 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face à diminuição da difusividade higrotérmica no barro vermelho, considerando  $T_{ext}=10^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=50^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 5-BVdt e 4-BVdt).

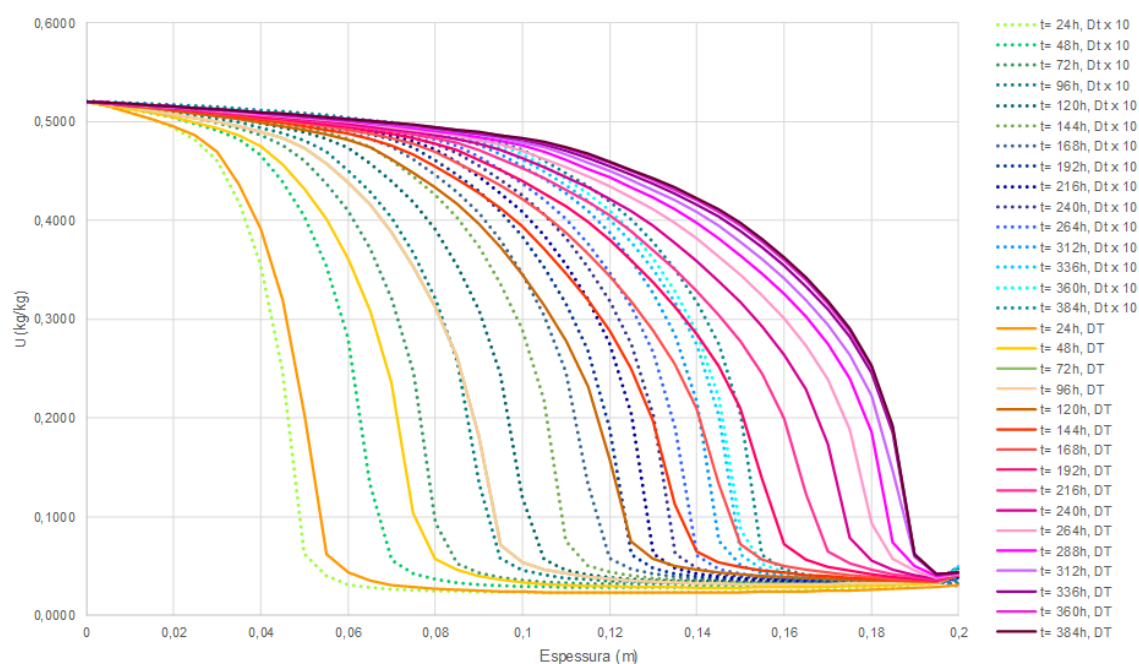


Figura 41 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face ao aumento da difusividade higrotérmica no betão celular, considerando  $T_{ext}=10^{\circ}C$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=50^{\circ}C$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 1-BCdt e 4-BCdt).

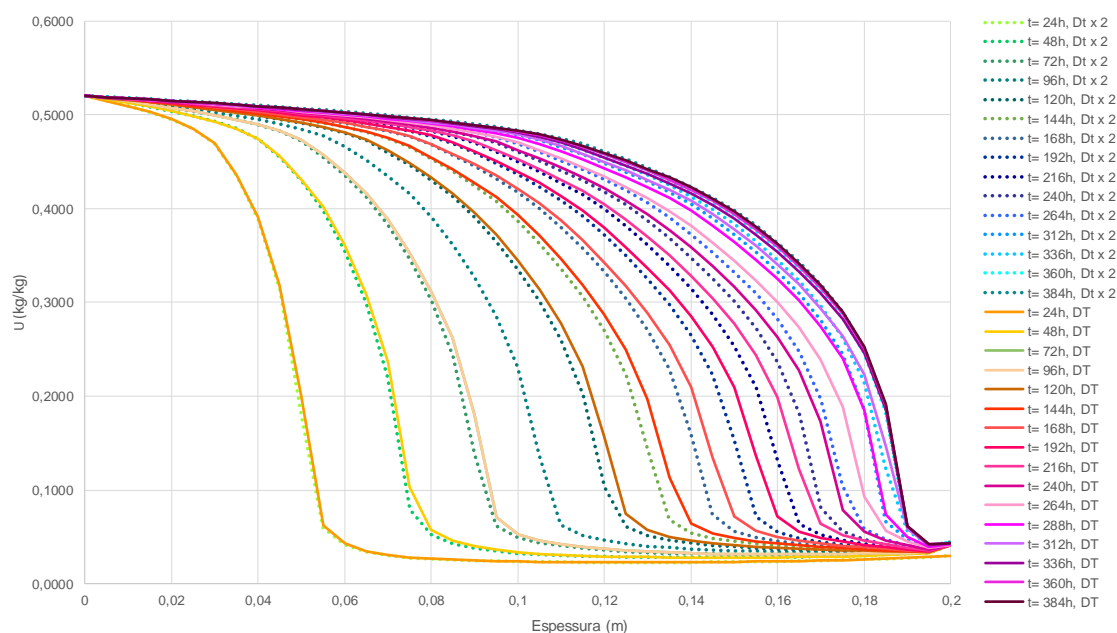


Figura 42 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face à diminuição da difusividade higrotérmica no betão celular, considerando  $T_{ext}=10^{\circ}C$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=50^{\circ}C$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 3-BCdt e 4-BCdt).

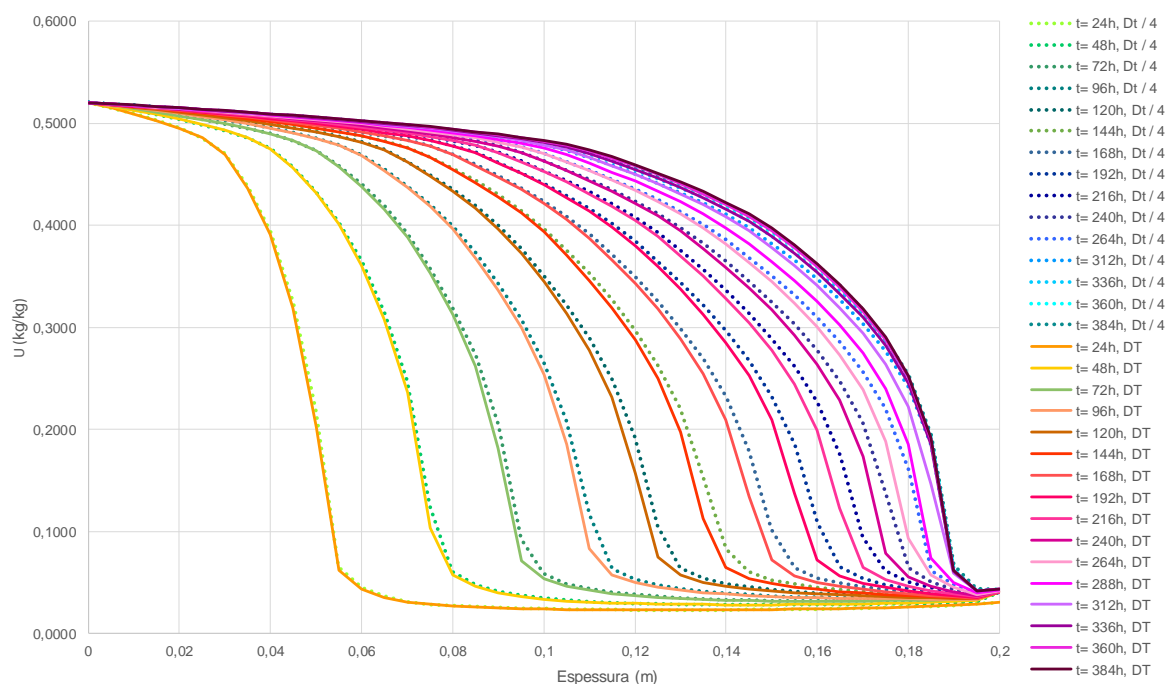


Figura 43 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face à diminuição da difusividade higrotérmica no betão celular, considerando  $T_{ext}=10^{\circ}C$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=50^{\circ}C$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 5-BCdt e 4-BCdt).

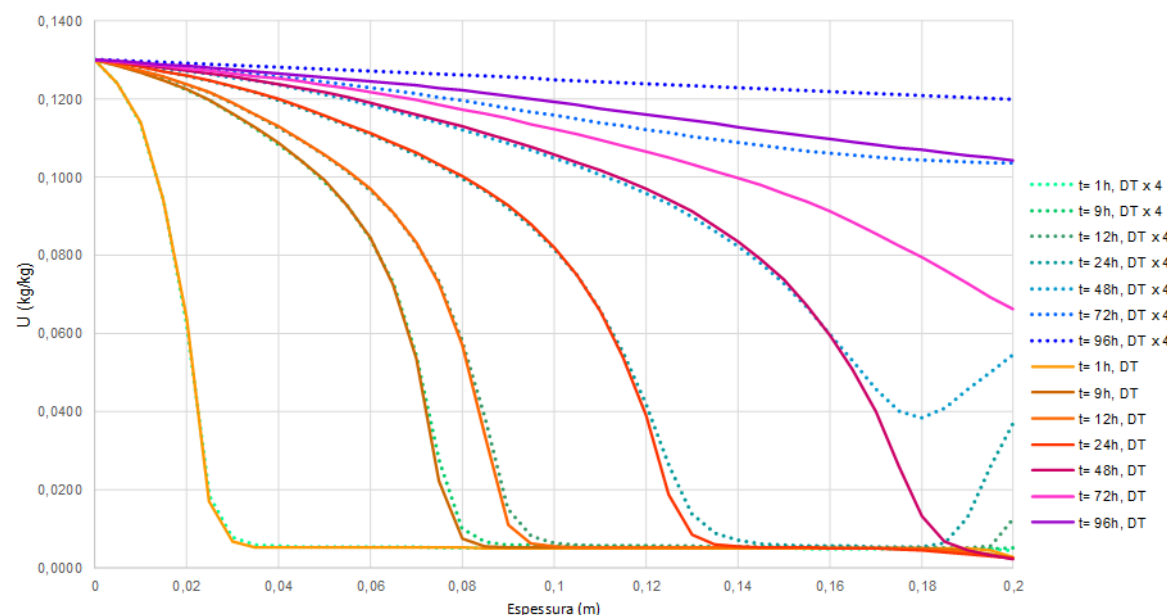


Figura 44 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face ao aumento da difusividade higrotérmica no barro vermelho, considerando  $T_{ext}=50^{\circ}C$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=10^{\circ}C$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 15-BVdt e 17-BVdt).

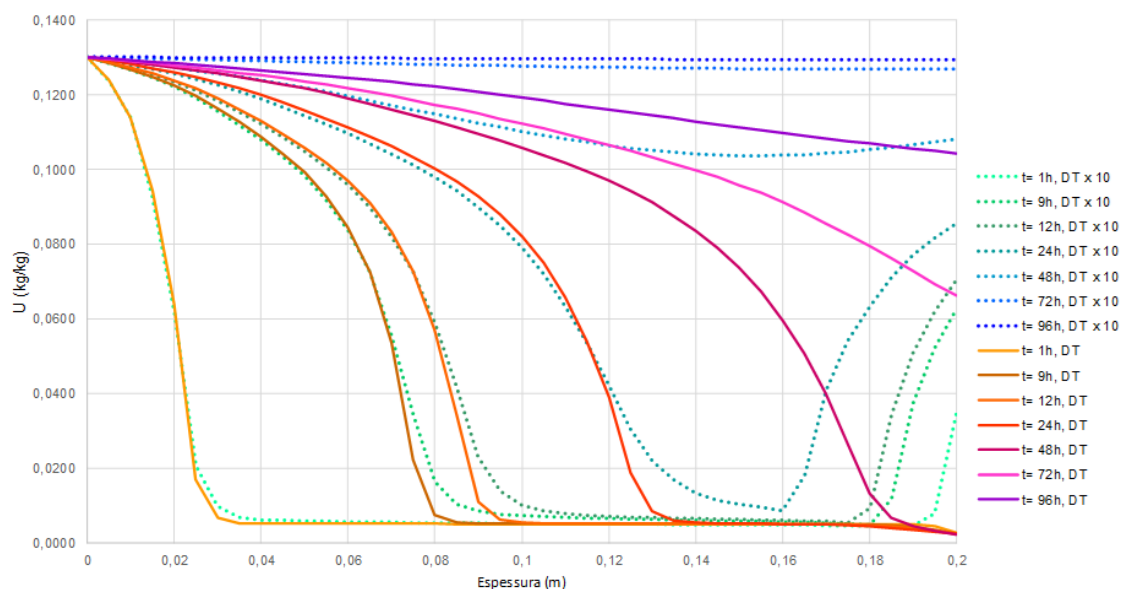


Figura 45 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face ao aumento da difusividade higrótérmica no barro vermelho, considerando  $T_{ext}=50^{\circ}C$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=10^{\circ}C$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 14-BVdt e 17-BVdt).

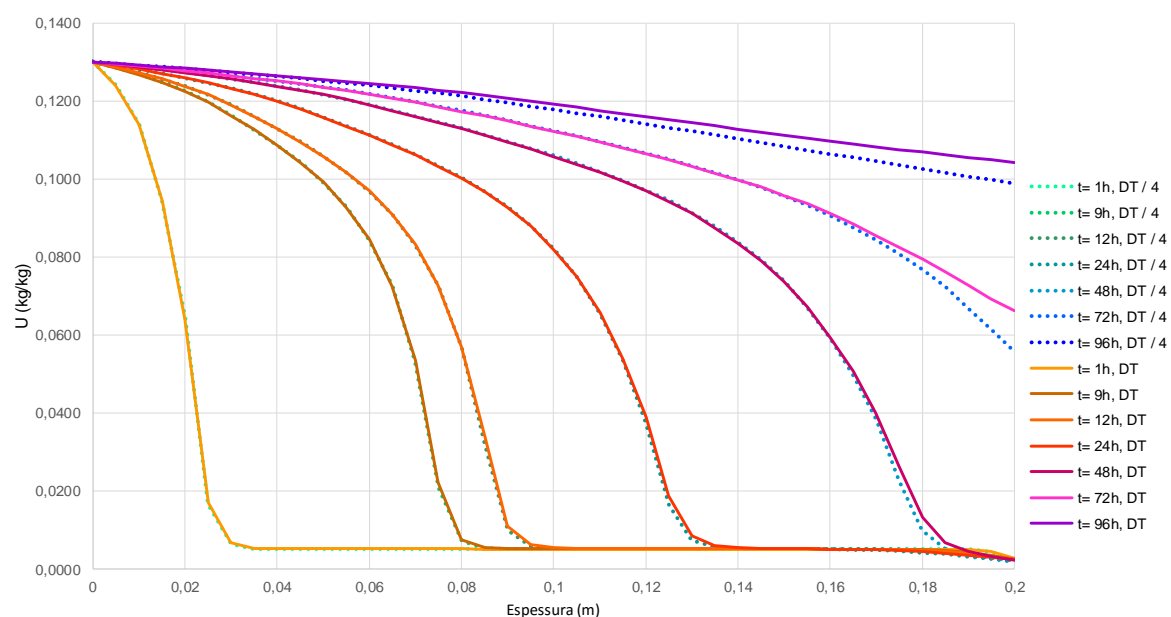


Figura 46 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face à diminuição da difusividade higrótérmica no barro vermelho, considerando  $T_{ext}=50^{\circ}C$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=10^{\circ}C$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 18-BVdt e 17-BVdt).



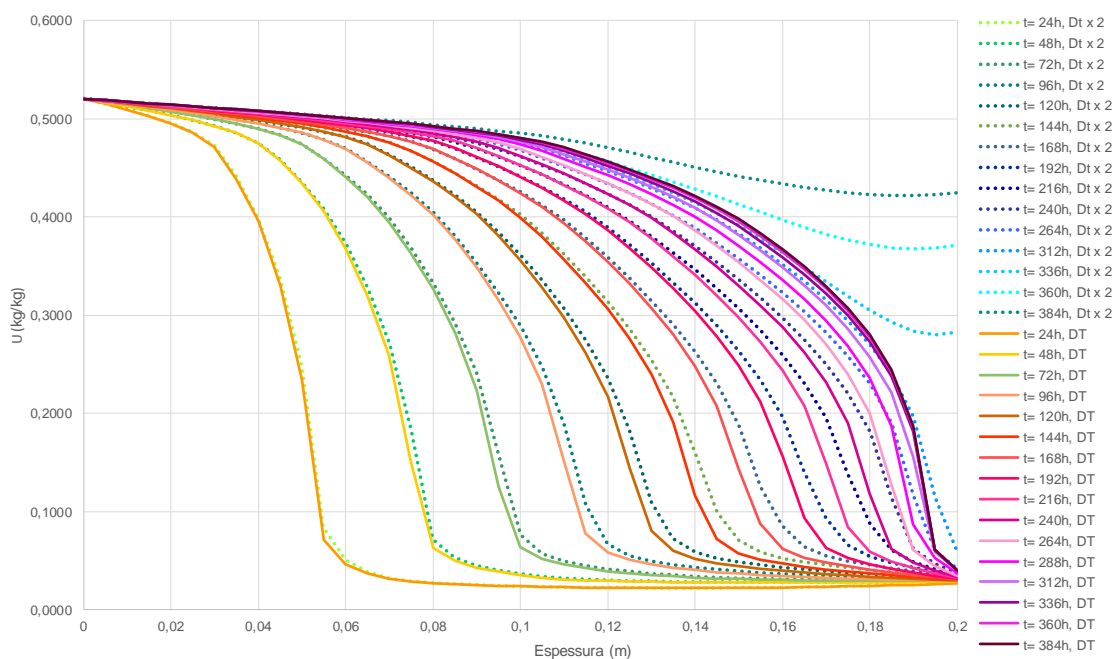


Figura 47 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face ao aumento da difusividade higrotérmica no betão celular, considerando  $T_{ext}=50^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=10^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 12-BCdt e 13-BVdt).

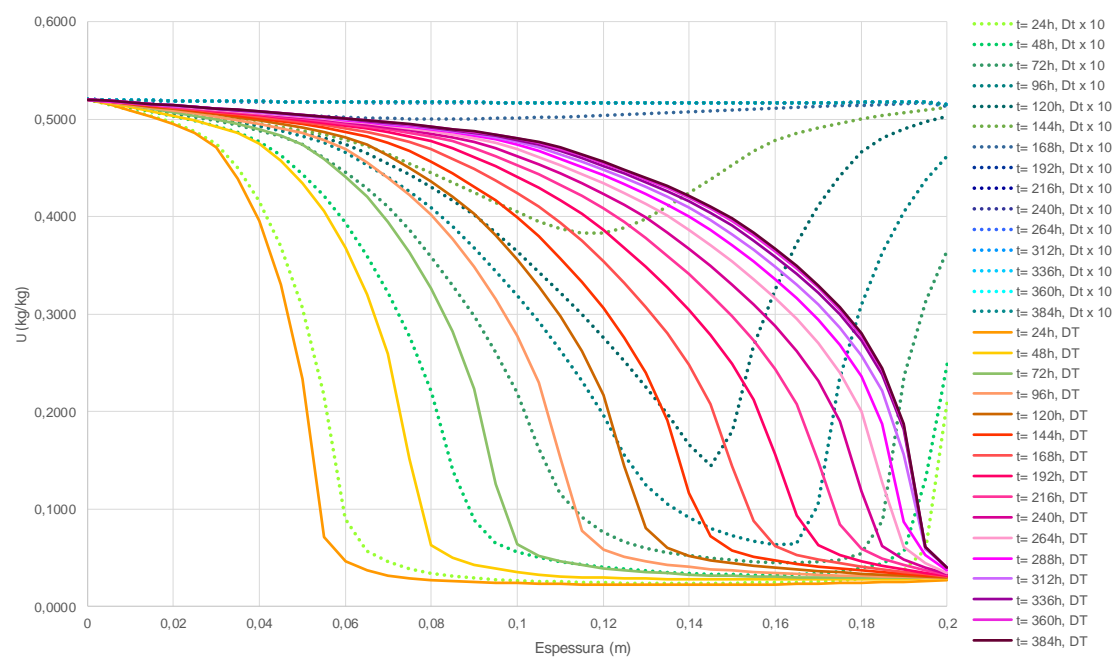


Figura 48 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face ao aumento da difusividade higrotérmica no betão celular, considerando  $T_{ext}=50^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=10^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 11-BCdt e 13-BCdt).

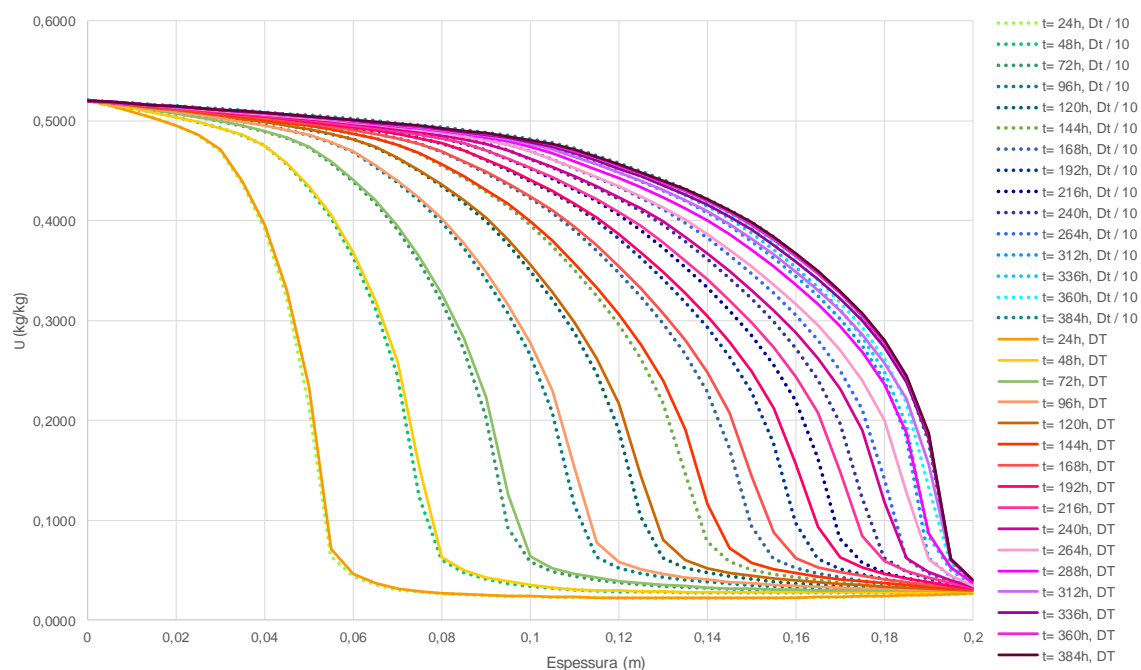


Figura 49 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face à diminuição da difusividade higrotérmica no betão celular, considerando  $T_{ext}=50^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=10^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 14-BCdt e 13-BCdt).

## **Anexo 11**

SIMULAÇÕES PARA A ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA CONDUTIBILIDADE TÉR-  
MICA,  $\lambda$

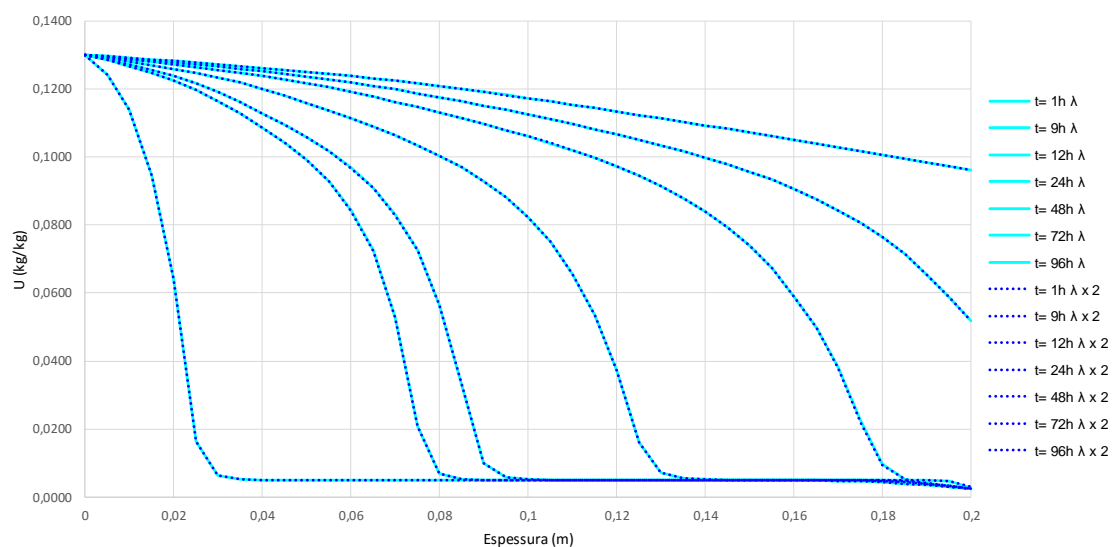


Figura 50 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face ao aumento da condutibilidade térmica do barro vermelho, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 5-BV $\lambda$  e 8-BV $\lambda$ ).

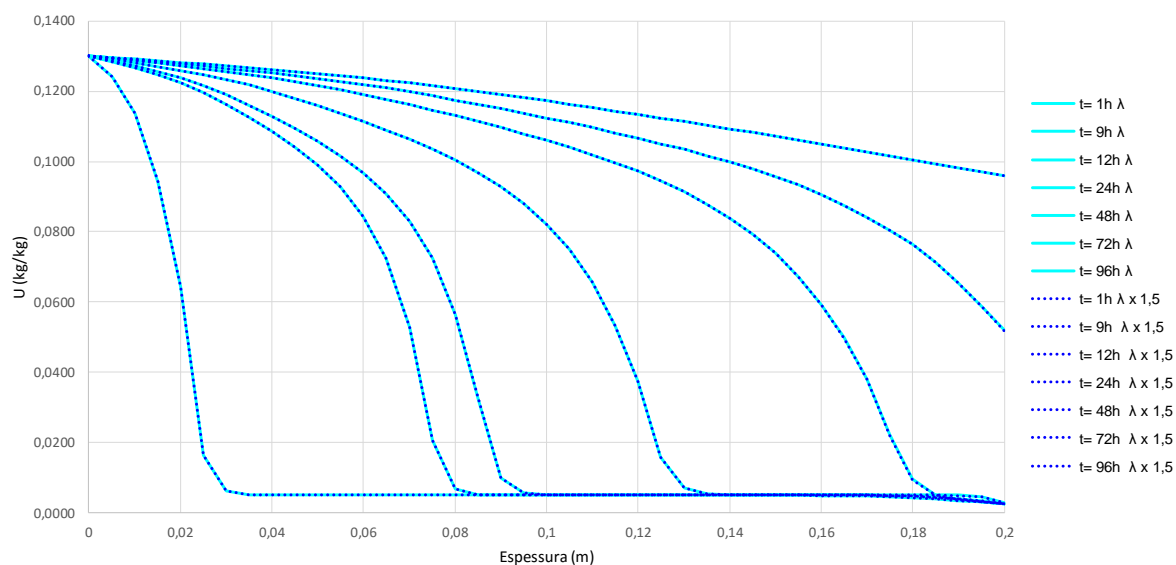


Figura 51 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face ao aumento da condutibilidade térmica do barro vermelho, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 6-BV $\lambda$  e 8-BV $\lambda$ ).

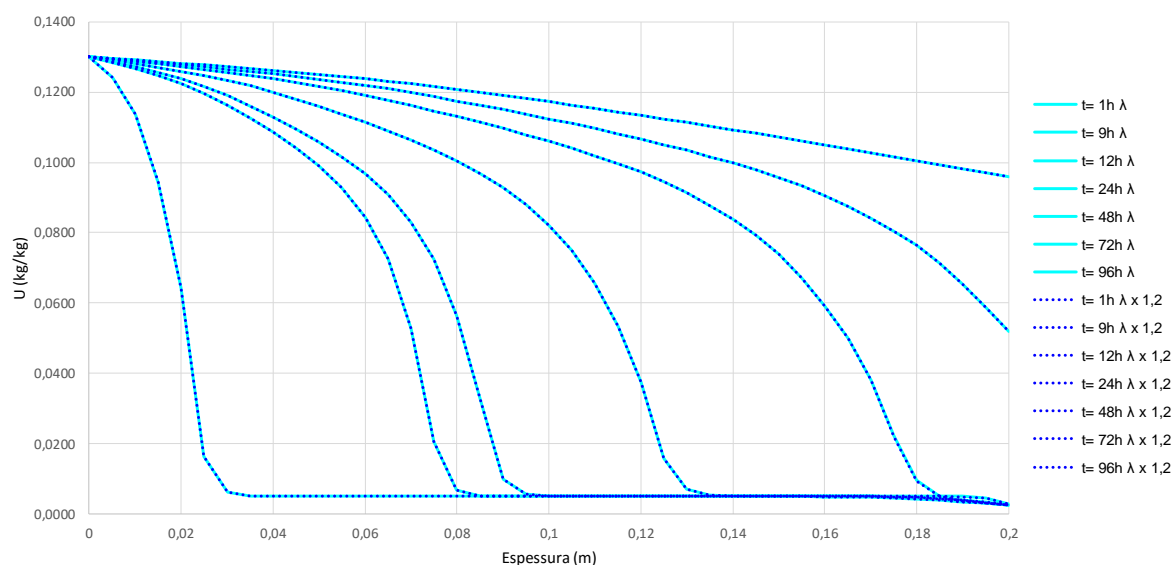


Figura 52 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face ao aumento da condutibilidade térmica do barro vermelho, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}C$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}C$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 7-BV $\lambda$  e 8-BV $\lambda$ ).

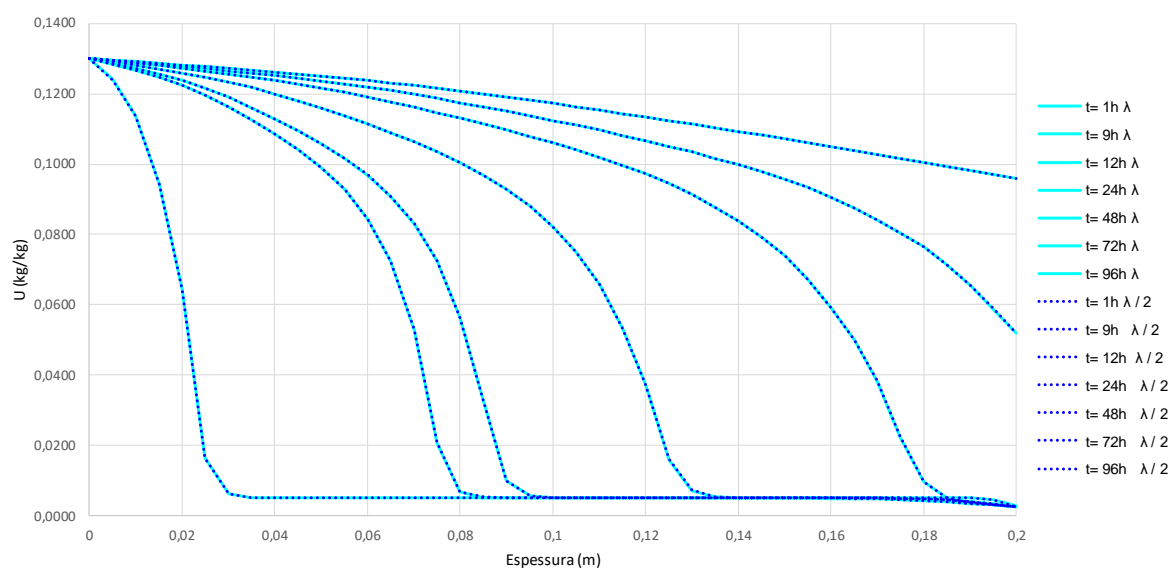


Figura 53 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face à diminuição da condutibilidade térmica do barro vermelho, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}C$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}C$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 9-BV $\lambda$  e 8-BV $\lambda$ ).

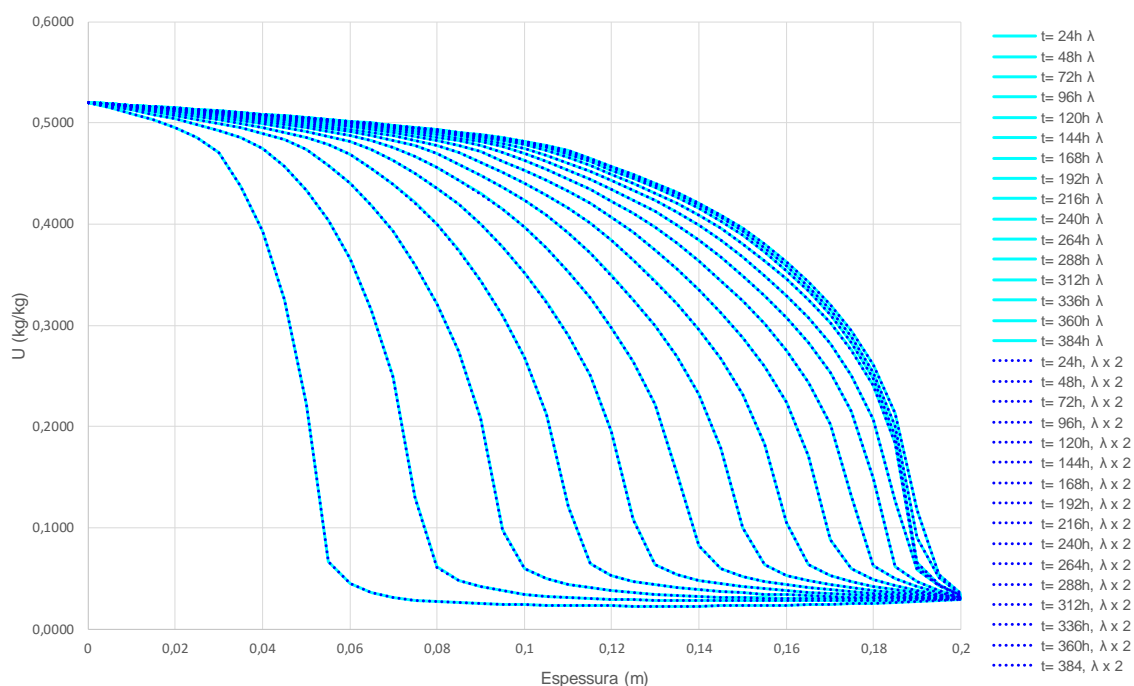


Figura 54 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face ao aumento da condutibilidade térmica do betão celular, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}C$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}C$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 5-BC $\lambda$  e 8-BC $\lambda$ ).

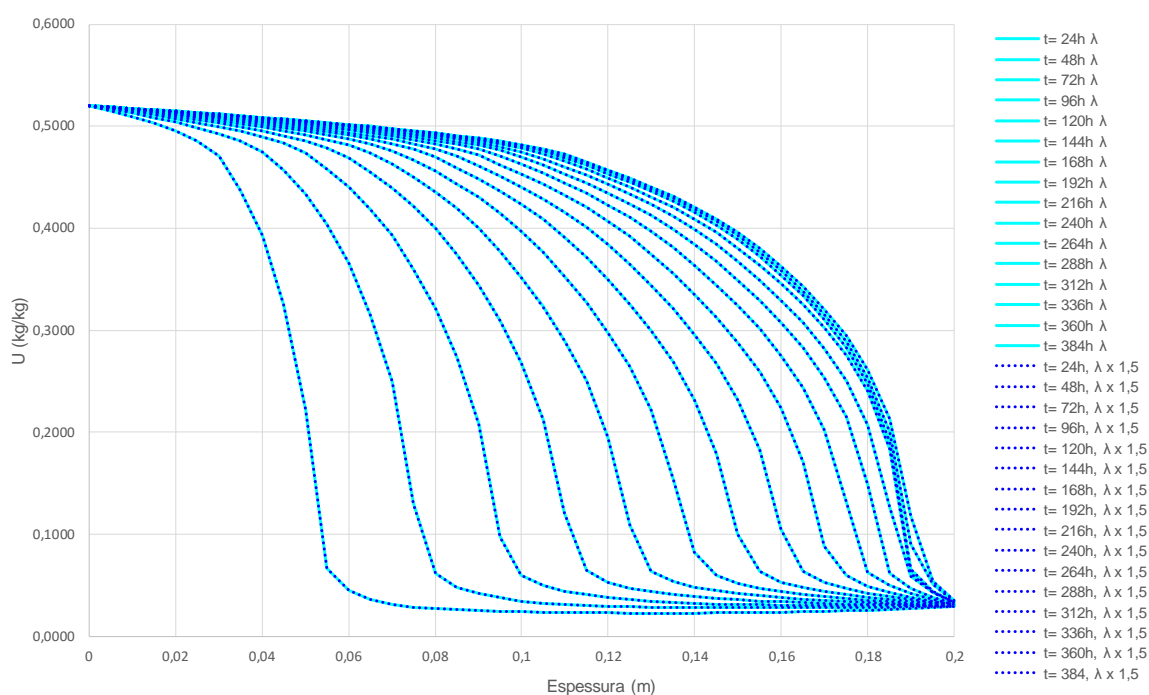


Figura 55 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face ao aumento da condutibilidade térmica do betão celular, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}C$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}C$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 6-BC $\lambda$  e 8-BC $\lambda$ ).

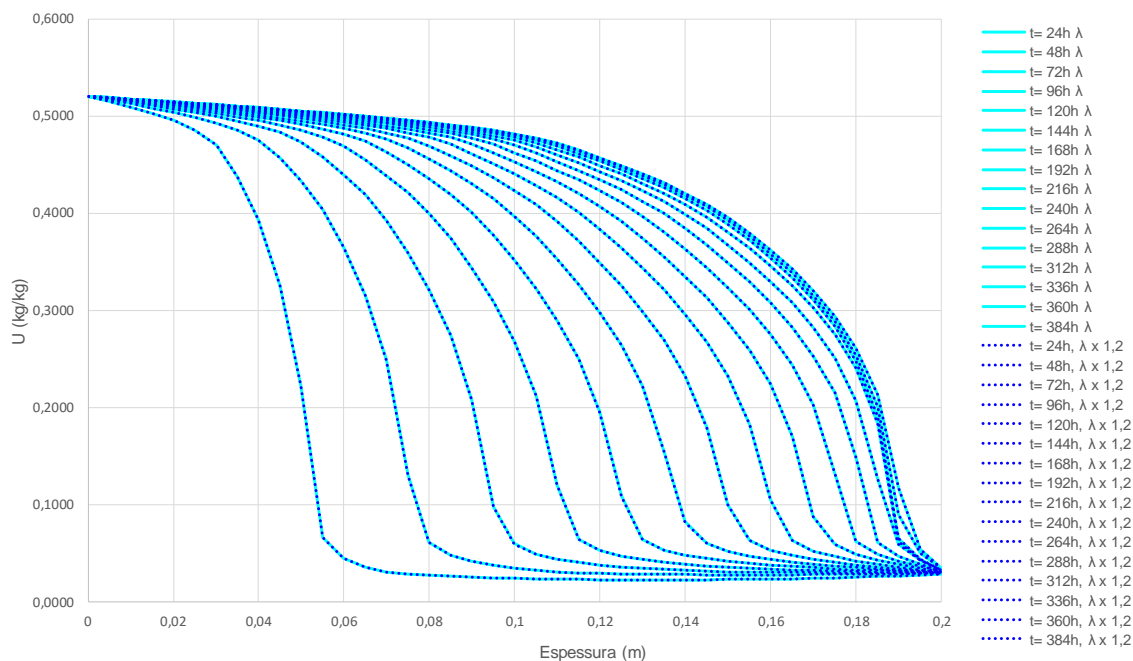


Figura 56 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face ao aumento da condutibilidade térmica do betão celular, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 7-BC $\lambda$  e 8-BC $\lambda$ ).

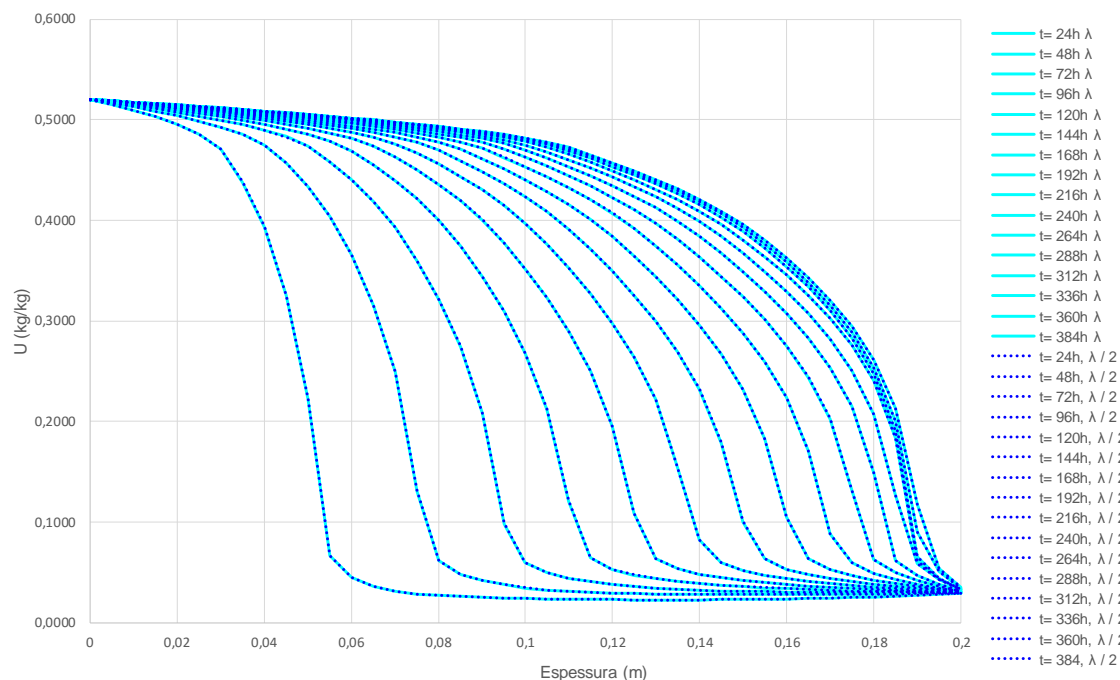


Figura 57 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face à diminuição da condutibilidade térmica do betão celular, considerando  $T_{ext}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 9-BC $\lambda$  e 8-BC $\lambda$ ).

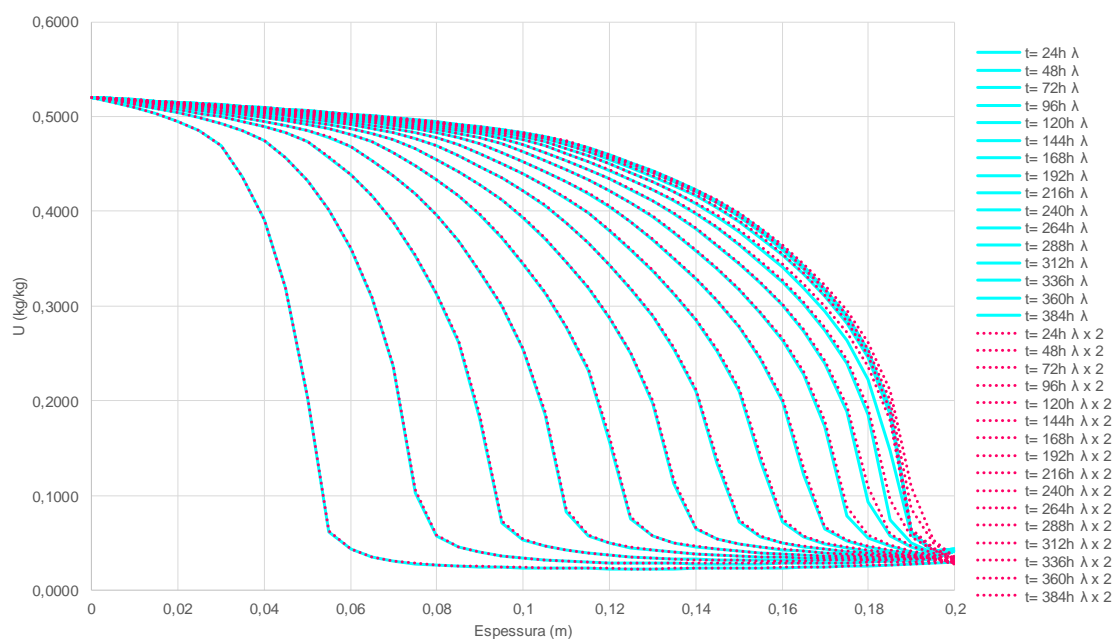


Figura 58 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face ao aumento da condutibilidade térmica do betão celular, considerando  $T_{ext}=10^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=50^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 1-BC $\lambda$  e 4-BC $\lambda$ ).

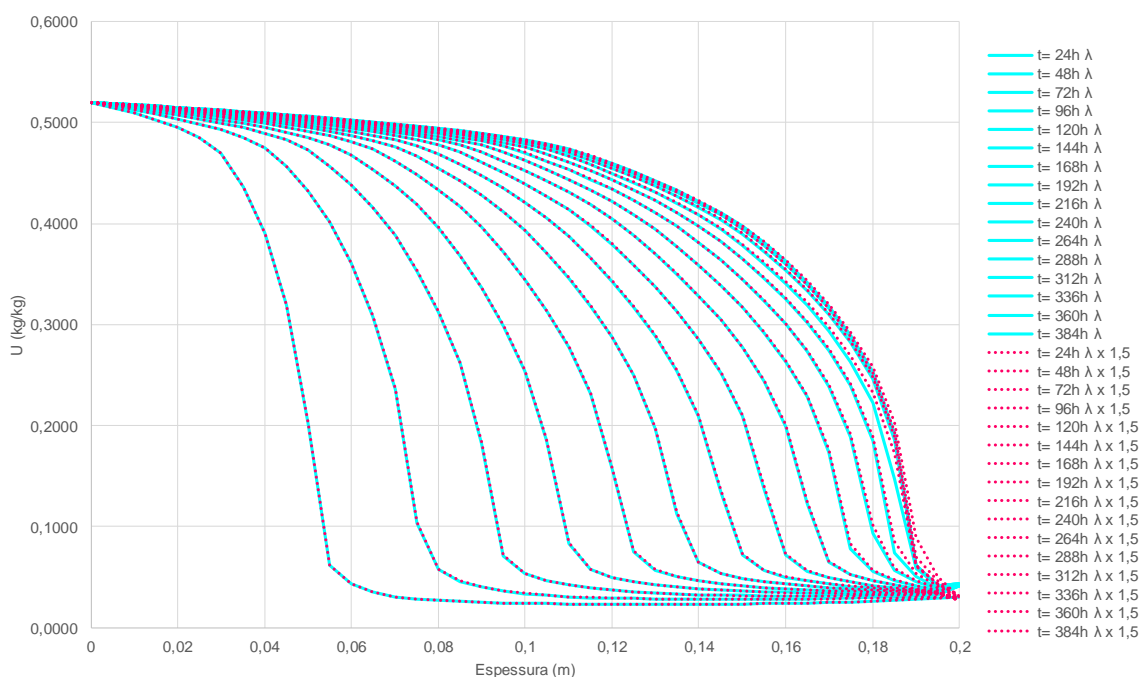


Figura 59 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face ao aumento da condutibilidade térmica do betão celular, considerando  $T_{ext}=10^{\circ}\text{C}$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=50^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 2- BC $\lambda$  e 4-BC $\lambda$ ).



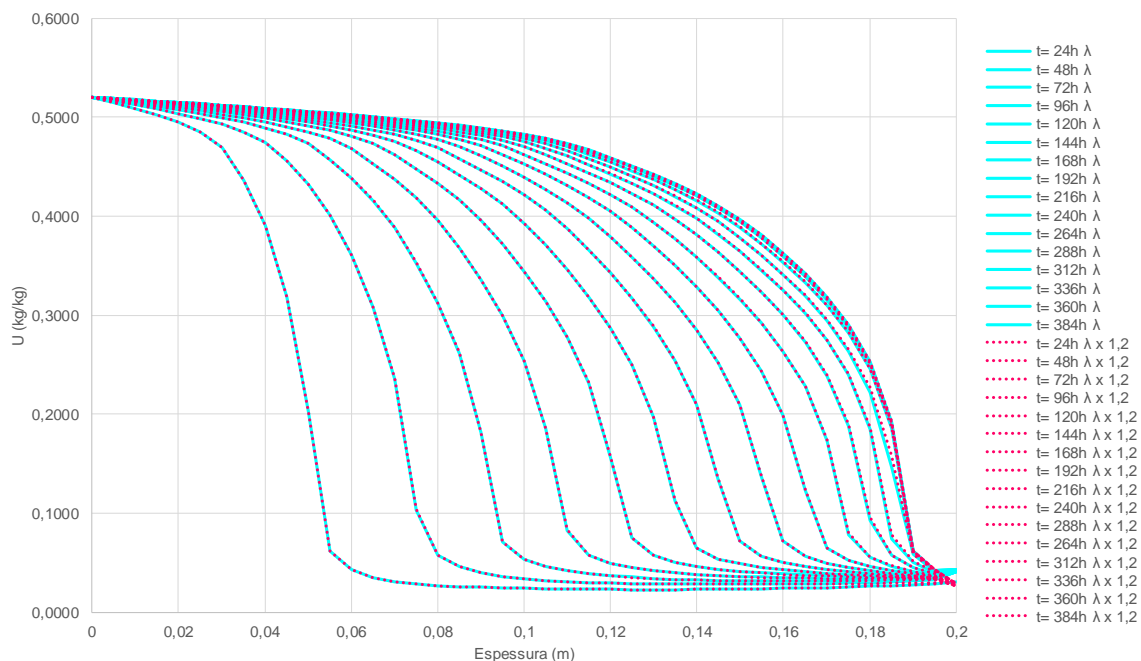


Figura 60 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face ao aumento da condutibilidade térmica do betão celular, considerando  $T_{ext}=10^{\circ}C$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=50^{\circ}C$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 3-BC $\lambda$  e 4-BC $\lambda$ ).

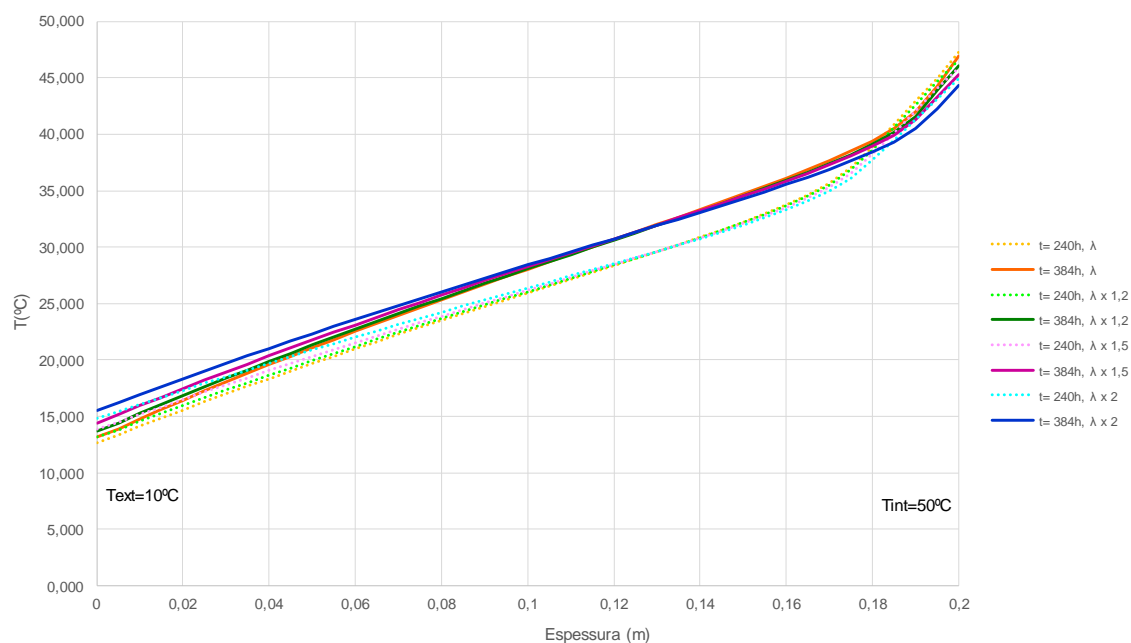


Figura 61 – Perfis de temperatura para o betão celular, em função da condutibilidade térmica, ao fim de 240h e 384h do processo de embebição, considerando  $T_{ext}=10^{\circ}C$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=50^{\circ}C$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 1-BC $\lambda$ , 2-BC $\lambda$ , 3-BC $\lambda$  e 4-BC $\lambda$ ).

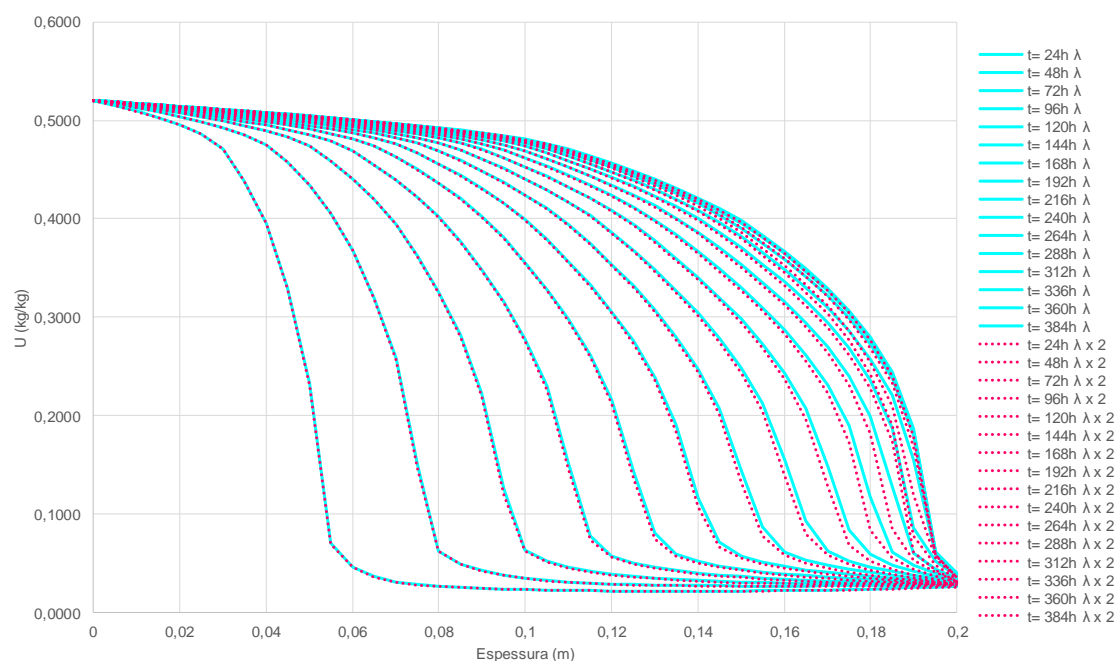


Figura 62 - Variação dos perfis do teor de umidade em embebição, face ao aumento da condutibilidade térmica do betão celular, considerando  $T_{ext}=50^{\circ}C$ ,  $HR_{ext}=100\%$ ,  $T_{int}=10^{\circ}C$  e  $HR_{int}=50\%$  (simulações: 10-BC $\lambda$  e 11-BC $\lambda$ ).